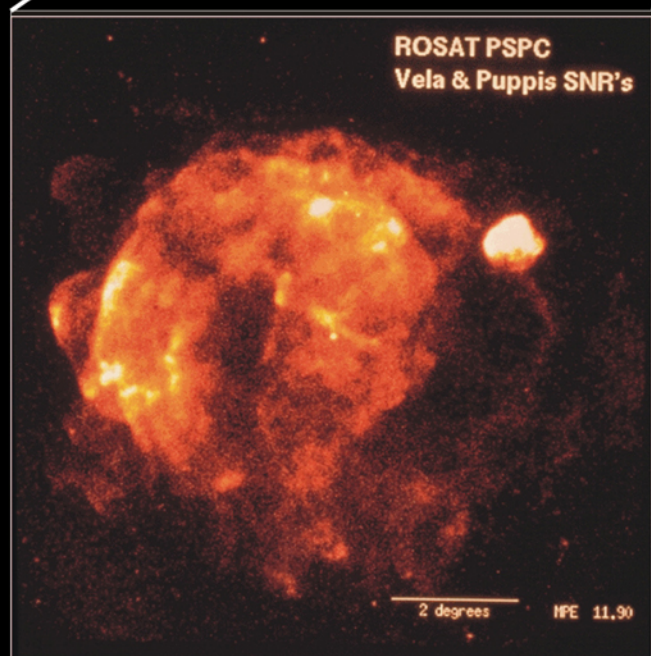


ASTRONOMÍA



Álvaro
Giménez
Cañete /
Alberto
Castro
Tirado

ASTRONOMÍA X
Álvaro Giménez Cañete
Alberto Castro Tirado



Diseño portada: ***L. Rolando Potts***

Diseño interior y maquetación: ***David Ruiz López***

© **EQUIPO SIRIUS, S.A.**

Edita: Equipo Sirius, S.A.

Avda. Rafael Finat, 34

28044 Madrid

correo-e: sirius@equiposirius.com

url: [http:// www.equiposirius.com](http://www.equiposirius.com)

ISBN: 84 - 86639 - 83 - 2

Dep. Legal:

Imprime: I.G. Afanias

Printed in Spain

ASTRONOMÍA

Álvaro Giménez Cañete
Alberto Castro Tirado

ÍNDICE

Indice general

PREFACIO	13
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO 1 LOS INICIOS.....	19
1.1. ¿Qué es la Astronomía X?	19
1.2. El espectro electromagnético.....	22
1.3. Hay que subir por encima de la atmósfera terrestre	24
1.4. ¿Existen realmente los rayos X cósmicos?	26
1.5. Las primeras medidas.....	28
1.6. Los años heroicos	30
1.7. Estrellas de rayos X	31
1.8. Nuevos objetos emisores de rayos X.....	33
1.9. La situación al terminar los años sesenta	38
CAPÍTULO 2 LOS PRIMEROS SATÉLITES	43
2.1. Los primeros experimentos a bordo de satélites	43
2.2. La misión Libertad	47
2.3. Otros experimentos de rayos X contemporáneos con Uhuru	50
2.4. Los satélites ANS y Ariel-5	54
2.5. El final de la época de las misiones pequeñas: SAS-3 y OSO-8	58
2.6. Los primeros grandes instrumentos en órbita	62
2.7. Telescopios de rayos X	67
2.8. La misión Einstein	72
2.9. Nuevos detectores de rayos X.....	75
CAPÍTULO 3 DE LA DECADA DE LOS 80 A LOS 90.....	83
3.1. La vuelta a las misiones pequeñas de rayos X.....	83
3.2. La primera misión europea importante: Exosat.....	88
3.3. Las misiones japonesas en los años ochenta	94
3.4. Las misiones rusas	97
3.5. ¿Cómo obtener imágenes en rayos X para energías altas?	104
3.6. El comienzo de los años noventa: de Rosat a Asca.....	108

CAPÍTULO 4 Fuentes de rayos X en nuestra Galaxia.....	123
4.1. De vuelta al Sol.....	124
4.2. ¿Y en el Sistema Solar?	126
4.3. Estrellas activas.....	129
4.4. Enanas blancas.....	135
4.4.1. Enanas blancas aisladas.	135
4.4.2. Enanas blancas en sistemas dobles: las variables cataclísmicas.....	138
4.4.3. Fuentes supersuaves.	139
4.5. Supernovas y nebulosas remanentes de explosiones supernova	139
4.6. Estrellas de neutrones y agujeros negros.....	144
4.6.1. Estrellas de neutrones aisladas: Geminga.	144
4.6.3. Erupciones de rayos X.....	152
4.6.4. Fuentes transitorias de rayos X.....	155
4.7. El centro de la Galaxia	164
CAPÍTULO 5 El mundo extragaláctico.....	175
5.1. Galaxias normales	175
5.2. Galaxias con brotes de formación estelar.....	178
5.3 Los núcleos activos de galaxias.	180
5.4. Cúmulos y Supercúmulos de galaxias	192
5.5. El fondo de radiación difusa de rayos X	196
CAPÍTULO 6 El futuro de la Astronomía X.....	205
6.1. El uso de detectores CCD	206
6.2. Telescopios de rayos X con láminas delgadas.....	208
6.3. Nuevamente, instrumentos a bordo de misiones pequeñas.....	209
6.4. Tres misiones medias y dos pequeñas.....	212
6.5. Una nueva generación de grandes misiones de rayos X	220
6.6. El observatorio ruso Spectrum X/G	220
6.7. La continuidad japonesa: Astro-E y Solar-B.....	224
6.8. El programa AXAF de la NASA	224
6.9. La aportación europea a los grandes observatorios de rayos-X: XMM (e INTEGRAL).....	227
6.10. Más allá del 2005.....	231
6.11. ¿Y después?	234
APÉNDICE.....	241
APÉNDICE: Mecanismos físicos para generar rayos X	243
Radiación sincrotrón.	246
Difusión Compton.	247
Radiación de frenado.	247

Recombinación radiativa.....	248
Pares electrón-positrón.....	249
 Bibliografía	 253
Bibliografía recomendada	254
 Índice Onomástico	 260
Índice de Materias.....	263
Índice de Lanzadores, Satélites e Instrumentos	265
Índice de Objetos.....	268

PREFACIO

Desde su nacimiento hace 35 años, la Astronomía X ha llegado a ser una de las herramientas indispensables para el astrónomo actual. La razón de este éxito resulta del hecho de que los fotones X nos revelan la existencia de procesos altamente energéticos en el Universo, y que esos procesos desempeñan un papel fundamental en la formación, dinámica y evolución de los objetos celestes en todas las escalas. En tanto en cuanto exista una densidad de energía extremadamente alta o bien, que ingentes cantidades de energías sean liberadas, los procesos naturales involucrados van a dar como resultado, bien el calentamiento del plasma hasta temperaturas del orden de millones de grados, o bien la aceleración de partículas hasta energías relativistas. En ambos casos, la energía se disipa en forma de emisión electromagnética en el rango de las longitudes de onda correspondientes a los rayos X.

Un importante factor adicional en el progreso fugaz de la Astronomía X ha sido que el espacio interestelar y el espacio intergaláctico son razonablemente transparentes a la radiación X, y por ello, mediante los rayos X, podemos observar objetos a distancias cosmológicas. Y aún más: los rayos X se pueden focalizar mediante un diseño adecuado de la óptica y, por ello, los rayos X comparten con la Astronomía óptica la enorme ventaja de poder usar telescopios. La Astronomía X ha mejorado su sensibilidad en cien millones en las últimas décadas. Su alcance se ha extendido a cada objeto celestial conocido: desde los cometas hasta la luna, desde las estrellas en formación hasta las supernovas, desde las galaxias normales hasta los cúasares y cúmulos de galaxias.

Su mayor aportación al conocimiento de los procesos que ocurren en el Universo ha sido: la primera demostración evidente de que el acrecimiento de materia es una de las mayores fuentes de energía en la Naturaleza; el descubrimiento de

objetos compactos (estrellas de neutrones y agujeros negros) en sistemas binarios; y el descubrimiento de un plasma intergaláctico que inunda el espacio entre las galaxias, el cual contiene más materia bariónica que las propias galaxias. Pero aún muchas más serán las contribuciones que la Astronomía X aportará en el futuro: entre otras, el estudio de formación de las estrellas y los mecanismos de disipación de campos magnéticos y de momento angular (un problema aún sin resolver); o el estudio de la formación y evolución de las grandes estructuras (cúmulos de galaxias) en el Universo primitivo.

Es un privilegio ser un astrónomo en esta era de desarrollos revolucionarios sin parangón desde los tiempos de Tycho, Kepler y Galileo. Es importante compartir estos logros de la mente humana con todos aquellos que tienen curiosidad y se preguntan a sí mismos. Los autores de este libro han aprehendido la excitación y promesa de este campo de la astronomía, rápidamente cambiante. Su esmerada reconstrucción de la historia temprana de este campo será de gran interés a una nueva generación de astrónomos que aprenderán cómo se ha ido progresando, con sus triunfos y sus amarguras, con instantes de entendimiento repentino y con trabajo laborioso y lento. Es para éstos, la tarea de continuar el estudio del Universo en que vivimos, una de las actividades más nobles del ser humano.

Munich, 2 de abril de 1997

Riccardo Giacconi

INTRODUCCIÓN

Nos hemos decidido a escribir este libro para llenar un vacío existente en la literatura científica española, en particular en lo referente a Astronomía donde se engloba la Astrofísica de rayos X, una de las ramas más jóvenes y con mayor desarrollo de la Ciencia actual.

La presente obra está dividida en seis capítulos y un apéndice. Está planteada de forma que la puedan entender tanto neófitos en el tema, sin necesidad de conocimiento alguno en Física, como estudiantes universitarios de cualquier carrera de Ciencias. Por ello hemos incluido más de 160 figuras y dibujos y por ello también, hemos introducido, en más de 20 cuadros explicativos a lo largo del texto y un apéndice, las nociones y fórmulas que entendíamos podrían complicar para algunos la lectura del texto principal, de modo que pueden sortearse si no desea profundizar en las cuestiones allí tratadas.

Los tres primeros capítulos recorren la historia de la Astronomía de rayos X, desde sus tímidos orígenes a finales de los años 40, pasando por el desarrollo en los 60 hasta llegar a su consolidación a mediados de esta década. No es sólo un mero relato histórico de los hechos, sino una manifestación de cómo el tesón ha movido a varias generaciones de científicos en pos del avance de la Ciencia y mejor conocimiento del Universo. El capítulo cuarto versa sobre la Astronomía X galáctica, desde el Sol, la luna y cometas hasta las enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros, para terminar en el centro de nuestra Galaxia. El capítulo cinco, el más condensado, proporciona información acerca del vasto universo extragaláctico, desde las galaxias satélites a la nuestra, pasando por el zoo de galaxias activas de una u otra clase, hasta llegar a los cúmulos de galaxias y al fondo difuso de radiación X, que hoy sabemos que en su mayor parte lo componen multitud de fuentes X que no podemos distinguir por sí solas. Por último, el capítulo sexto

discurre por los instrumentos más recientes y la ciencia que están revelando, desde LEGRI en el flamante satélite español *Minisat-01*, hasta los nuevos proyectos de las Agencias espaciales rusa, americana, europea y japonesa, *Spectrum XT*, *AXAF*, *XMM*, *Astro-E* y los que ya se vislumbren al abrigo de la *Estación Espacial Internacional* y otras colaboraciones internacionales hasta el año 2015.

Y no queremos terminar, sin expresar desde aquí nuestro más sincero agradecimiento al editor, Jorge Ruiz, y a todos aquellos sin cuya inestimable ayuda, de algún modo u otro, no hubiera sido posible la realización de este trabajo: Eva Alcoholado, Javier Gorosabel, Niels Lund, Miguel Más, Victor Reglero, David Ruiz, María de Santos, Herb Schnopper y Rashid Sunyaev. Y como no, al Prof. Riccardo Giacconi, uno de los padres de la Astronomía X, con cuyo prólogo nos honra al comenzar esta obra.

Álvaro Giménez Cañete
Alberto Javier Castro Tirado

Villafranca del Castillo, 28 de octubre de 1997

CAPÍTULO 1

I LOS INICIOS

1.1. ¿Qué es la Astronomía X?

El título de este libro parece indicar que vamos a tratar de una astronomía «desconocida». La letra X suele emplearse en el mundo del álgebra, y en general en todas las ciencias, para denominar a la incógnita de un problema. ¡Llámalo X! se dice normalmente para identificar algo que no conocemos. De hecho, esta tradición se encuentra en el origen de la Astronomía X. Nuestro propósito en este libro es introducir al lector en una rama apasionante de la astrofísica moderna a través de la exploración de una parte del Universo «no visible»: el Universo en el rango de los rayos X.

Los rayos X fueron descubiertos por el alemán Wilhelm K. Röntgen en la Universidad de Würzburg, Baviera, el 8 de noviembre 1895 por lo que ya se ha cumplido el primer centenario de este importante logro de la ciencia. Röntgen -que por entonces tenía 50 años- trabajaba en experimentos con rayos catódicos relacionados con la fluorescencia generada en ciertos elementos químicos y, por casualidad, detectó la existencia de una radiación invisible que atravesaba materiales opacos a la luz normal. En la navidad de 1895, hizo de la mano de la mujer que él había tomado en matrimonio, la mano más famosa del mundo, cuando la presentó en la primera imagen tomada en rayos X (figura 1). Como buen científico, Röntgen se preocupó por caracterizar experimentalmente la mayor cantidad posible de propiedades de esta radiación invisible. Por ejemplo, comprobó la capacidad que tenía de atravesar diferentes tipos de materiales (el plomo resultaba ser opaco), o que los rayos no cambiaban de dirección en presencia de campos magnéticos (luego no podían ser partículas cargadas). Sin embargo, no consiguió hacerse una idea clara de la naturaleza de esta radiación y, en consecuencia, la llamó X, por el signo matemático de lo desconocido.

En 1901, Röntgen obtuvo por su descubrimiento el primer premio Nobel de Física y, en los años siguientes, varios grupos de investigadores se dedicaron al

Fig. 1: La mano de la esposa de W. Roentgen: la primera imagen en rayos-X.



estudio de la naturaleza física de los rayos X. Algunos opinaban que eran chorros de partículas, como los rayos catódicos, otros (incluyendo al propio Röntgen) optaban por considerarlos ondas semejantes a las del sonido y otros, finalmente, pensaban que los rayos X eran ondas electromagnéticas similares a la luz pero con diferente longitud de onda. El también alemán Max von Laue demostró en 1912 la naturaleza de los rayos X como ondas electromagnéticas mediante un experimento de difracción a través de cristales de sulfuro de zinc. Por estos trabajos obtuvo el premio Nobel de Física en 1914.

Posteriormente, en 1923, el norteamericano Arthur H. Compton repetiría los experimentos de von Laue con técnicas y modelos teóricos más elaborados, para medir con precisión las longitudes de onda de los rayos X dispersados por una red cristalina. Con sorpresa, descubrió un aumento de la longitud de onda, hoy conocido como efecto Compton, que sólo podía interpretarse considerando el fotón incidente de rayos X como una partícula. Se puso así en evidencia que la radiación electromagnética tenía tanto una naturaleza ondulatoria como corpuscular. Esta dualidad también fue analizada, desde el punto de vista de las partículas que presentan características ondulatorias, por el francés Louis de Broglie y dio lugar a importantes y conocidos desarrollos de la Física moderna. Compton recibió el premio Nobel en 1927, pero no vamos a seguir con esta historia de los rayos X y la Física atómica, que nos adentraría en los mundos de la radioactividad y de la radiación cósmica, incluso de la estructura del átomo y su núcleo, para no desviarnos de nuestro objetivo inicial: la Astronomía de rayos X.

Ya que la naturaleza del nuevo tipo de radiación había sido aclarada, los rayos X pasaron a llamarse rayos Röntgen, en honor a su descubridor. Pero, quizás debido a la dificultad de pronunciar su nombre fuera de Alemania, esta denominación

duró poco y ha prevalecido el de radiación X hasta hoy día, quedando el nombre de Röntgen para una unidad de dosis de radiación X. Las aplicaciones de estos rayos a la Medicina se extendieron enormemente, como era lógico, por su facilidad para atravesar los tejidos blandos del cuerpo. El propio Röntgen que como hemos dicho ya había podido fotografiar los huesos de la mano de su mujer, había creado un gran interés en la sociedad en general acerca de las posibilidades de la «visión X». Se llegó a especular con atentados a la moralidad perpetrados por personas equipadas con gafas preparadas para ver rayos X y, naturalmente, se dotó al héroe del cómic americano, Superman, con poderes para ver con rayos X.

Según reza hoy al pie del busto que Röntgen tiene en Munich (Alemania): «Los rayos Röntgen muestran al médico el interior del cuerpo humano, al ingeniero, el interior de los materiales y al sabio, la estructura de los átomos».

Los rayos X, como ya hemos dicho, son ondas electromagnéticas similares a la luz visible pero de mayor energía, igual que la luz azul es más energética que la luz roja. La energía de una onda electromagnética aumenta conforme su longitud de onda decrece y la luz muestra propiedades cada vez más parecidas a una partícula que a una onda. Las partículas de radiación electromagnética se llaman fotones y para estudiar la radiación X que produce un objeto determinado, debemos capturar la mayor cantidad de este tipo de fotones que podamos. En particular, los detectores modernos de rayos X se basan en la medida de destellos de luz visible o de corrientes eléctricas producidas en la interacción de los fotones de alta energía con la materia, ya sea en un gas o un sólido de tipo semiconductor.

En los primeros momentos no estaba nada claro que el descubrimiento de los rayos X pudiera tener alguna importancia para el desarrollo de la Astronomía. No se llegó a pensar que fuera posible recibir rayos X procedentes de las estrellas o de las galaxias, y que la información proporcionada por esta radiación nos haría cambiar radicalmente las ideas existentes a mediados del siglo XX acerca de la física cósmica. La Astronomía se conoce como una de las ciencias más antiguas desarrolladas por el hombre. Su historia se puede remontar a más de 3.000 años antes de Cristo cuando, por primera vez, se trazaron las constelaciones en el cielo y se comenzó a trabajar en el establecimiento de un calendario preciso para la medida del tiempo. Sin embargo, hasta principios del siglo XVII, la única herramienta que tenían los astrónomos para observar el cielo era el ojo desnudo. Con la invención del telescopio por parte del holandés Hans Lippershey en 1608, y la aplicación de este nuevo instrumento a la Astronomía por parte del italiano Galileo Galilei un año después, tuvo lugar un tremendo salto hacia adelante. En los comienzos del siglo XX, la tecnología había avanzado lo suficiente como para construir potentes telescopios que permitieron a los astrónomos observar objetos cada vez más lejanos y desarrollar teorías acerca de la estructura y evolución de las estrellas, las galaxias o el propio Universo. Toda la información disponible en aquella época se basaba, sin embargo, en medidas dentro de un rango muy estrecho del espectro electromagnético: el visible.

Pero, ¿por qué tendría que emitirse toda la radiación del Universo en la banda estrecha de la radiación óptica? Es decir, ¿por qué tendrían que adaptarse los mecanismos físicos de generación de energía de todo el Universo al rango del espectro al que es sensible el ojo humano? El científico del siglo XX ciertamente no era propenso a este tipo de Universo centrado en el hombre. Además, ya en el siglo XVIII, el gran astrónomo inglés Sir William Herschel había encontrado que cuando se obtiene un espectro del Sol y se coloca un termómetro más allá del rojo, en el rango de colores en que se descompone la luz, se detecta un incremento de temperatura. Herschel dedujo que estaba siendo testigo de los efectos de una radiación invisible, infrarroja, y que los objetos celestes podían emitir luz fuera del rango visible del espectro electromagnético. Se había «observado» por primera vez radiación no óptica del cielo. La detección de fotones al otro lado del espectro, más allá del azul, tardaría aún mucho tiempo en llegar.

1.2. El espectro electromagnético

Por supuesto, el Universo no es todo lo que vemos sino también lo que no vemos. Además de explorar el cielo en longitudes de onda infrarrojas, siguiendo los comentarios de Herschel respecto al Sol, en los años treinta se descubrió, empleando antenas y equipos receptores de ondas radio, la importante emisión de numerosos objetos celestes en este rango del espectro. Inmediatamente, se construyeron grandes radiotelescopios para investigar el Universo en esta nueva ventana de información que se abría. Había nacido la Radioastronomía, que nos ha permitido descubrimientos espectaculares, como los púlsares o la estructura y composición del medio interestelar en nuestra galaxia.

Pero, vayamos por partes. Si los rayos X pueden considerarse como un tipo más de onda electromagnética, como la luz visible, podremos estudiarlos dentro del espectro electromagnético. En la figura 2 mostramos un esquema de dicho espectro, es decir, de los diferentes tipos de radiación, para valores distintos de la longitud de onda, con su energía asociada si contemplamos los fotones como partículas. Los rayos X ocupan una zona importante del espectro. Son las ondas electromagnéticas con longitudes de onda entre aproximadamente 0,25 y 100 Å. Por supuesto, es arbitraria la definición de fronteras entre los diferentes tipos de ondas. No existe un valor exacto que separe la radiación ultravioleta de los rayos X, o a estos de la radiación gamma. Tradicionalmente, se considera que el extremo ultravioleta llega hasta los 100 Å debido a los cambios en los sistemas de detección que es preciso utilizar. En el caso de la radiación gamma, generalmente se marca la frontera en la zona a partir de la cual el comportamiento corpuscular de la radiación es mucho más importante que el puramente ondulatorio. En lo que sigue vamos a considerar el rango de los rayos X entre 0,25 y 100 Å, o lo que es lo mismo, entre 0,125 y 50 keV, si lo expresamos en función de la energía de los fotones incidentes. Este rango, por otro lado, es bastante amplio. Recordemos que

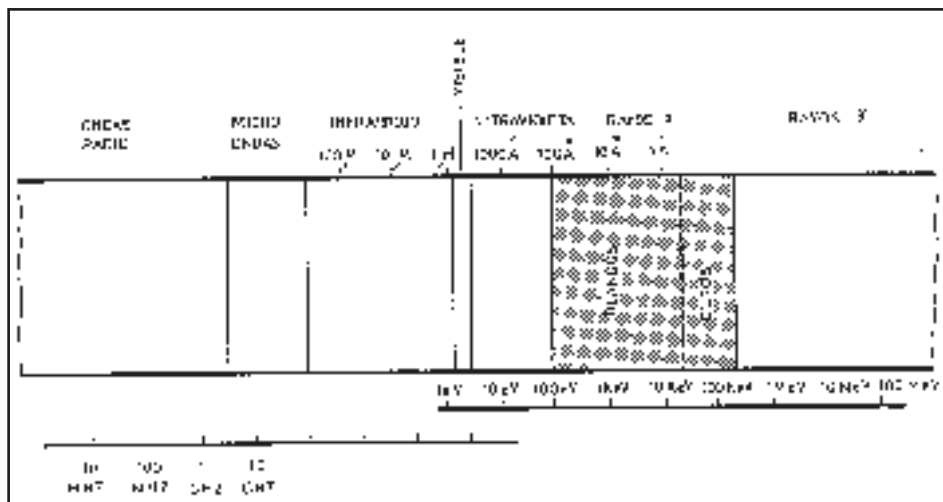


Fig. 2: Espectro electromagnético con indicación del rango ocupado por la radiación X.

la astronomía óptica se mueve entre valores de 3.900 y 7.800 Å aproximadamente, es decir, entre energías de 1,6 y 3,2 eV. Por ello, es preciso tener en cuenta distintos métodos de detección y análisis dentro del rango de los rayos X y es usual hablar de rayos X «blandos» hasta 1 keV y de rayos X «duros» para los más energéticos a partir de 10 keV, siendo considerada la zona entre 1 y 10 keV como la banda clásica de los rayos X, la más observada hasta la fecha.

La capacidad de penetración de los rayos X frente a la radiación de menor energía, en el óptico, el infrarrojo o las ondas radio, que tanto impresionó a Röntgen al descubrirlos, permitía prever que esta nueva región del espectro electromagnético aportaría datos nuevos e importantes para los astrónomos. Si se demostraba la existencia de radiación X procedente de los objetos celestes, habríamos encontrado un canal de información valiosísimo acerca de los lugares en los que se produce, al poder atravesar -especialmente los fotones más energéticos- regiones extensas sin ser absorbidos, como le ocurre a la luz visible normal a su paso por regiones densas en polvo y gas del medio interestelar. Ciertamente, la Galaxia debe ser prácticamente transparente a los rayos X, ya que el medio interestelar, según nuestros conocimientos de su densidad y composición, no debe absorber fotones con energías superiores a los 2-3 keV. Por tanto, se podría observar toda la Galaxia, incluyendo su enigmático centro, sin más limitaciones que la confusión de fuentes por falta de resolución angular o la debilitación de los flujos por la distancia. Pero además, si en el Universo se emitieran cantidades significativas de radiación X, se nos abriría la puerta para estudiar las situaciones más violentas, de mayor temperatura, y los procesos físicos más energéticos como veremos más adelante, ya que éstos serían los únicos capaces de generar cantidades importantes de radiación de alta energía, en el rango X.

1.3. Hay que subir por encima de la atmósfera terrestre

Desgraciadamente para el astrónomo, la atmósfera de la Tierra no es transparente a los rayos X. Afortunadamente para el resto de los seres vivos así es, lo cual es muy importante, ya que el paso de radiación, no sólo ya X, sino ultravioleta y gamma, acabaría con cualquier esperanza de vida en la superficie de la Tierra. De este modo, cualquier posibilidad de medir rayos X generados en el espacio pasa por la instalación de equipos de medida por encima de la atmósfera de la tierra. A partir de una altura de aproximadamente 120 km sobre la superficie terrestre, la atmósfera ya es suficientemente débil como para poder medir sin problemas radiación X de origen cósmico. En alturas inferiores, del orden de 40 km, se pueden empezar a realizar medidas pero sólo para los rayos X más energéticos o «duros» que son suficientemente penetrantes. En la figura 3 mostramos la transparencia de la atmósfera terrestre, a diferentes alturas sobre la superficie, para los distintos rangos del espectro electromagnético. La zona con trama indica hasta qué altura, la intensidad de radiación incidente se reduce a menos de la mitad de su valor original. Se puede ver como, tanto la radiación ultravioleta como los rayos X blandos tienen dificultades insalvables para penetrar hasta el nivel en que se encuentran los observatorios astronómicos en tierra.

Pero, la realización de observaciones de 40 a 120 km de altura requiere el uso de tecnologías propias de la moderna era espacial, ya que no hay ni montañas ni aviones a esos niveles. No es de extrañar, por tanto, que la Astronomía X careciera de entidad antes de los años cincuenta. La era del espacio generalmente se considera que comenzó en 1957, con el lanzamiento por la entonces Unión Soviética del primer satélite artificial, el *Sputnik*, palabra rusa que significa «satélite», precisamente. Sin embargo, ya anteriormente, al poco tiempo de terminar

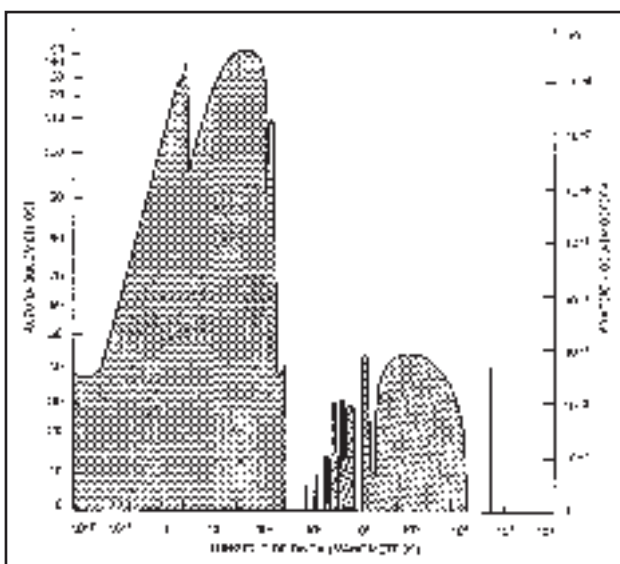


Fig. 3: Absorción atmosférica de la radiación electromagnética.

Aunque la absorción atmosférica prácticamente desaparece para los detectores puestos en órbita, a partir de unos 300 km, aún permanecen otros tipos de interferencias. Por ejemplo, el flujo de partículas energéticas de la radiación cósmica, que mencionábamos anteriormente, afecta las medidas de los detectores de rayos X. Igualmente, las partículas atrapadas por la magnetosfera terrestre, formando unos cinturones de radiación alrededor de nuestro planeta, afectan seriamente a los detectores utilizados para la medida de rayos X. La densidad de estas partículas varía según la actividad solar y su distribución presenta densidades máximas a alturas suficientemente altas para que afecten poco a los satélites en órbita terrestre baja (por debajo de los 800 km) si se evitan los polos magnéticos. Sin embargo, se conoce la existencia de una concentración especialmente alta en la región del Atlántico Sur, a la que se denomina como Anomalía del Atlántico Sur (AAS), donde el flujo puede aumentar en varios órdenes de magnitud (ver figura 4). Por ello, esta zona ha de ser evitada por los satélites que pretenden estudiar el

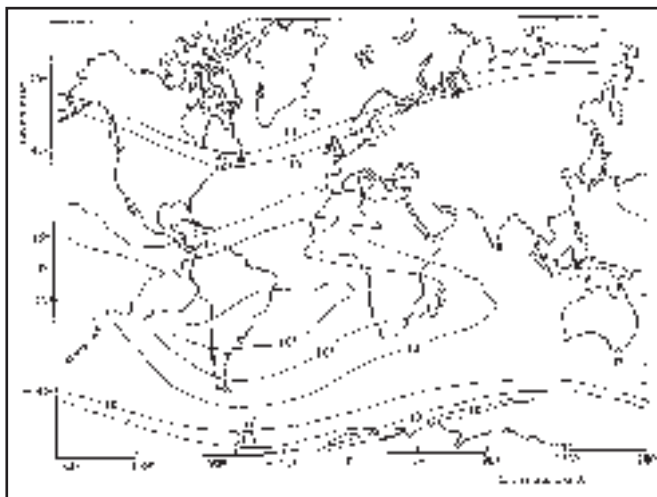


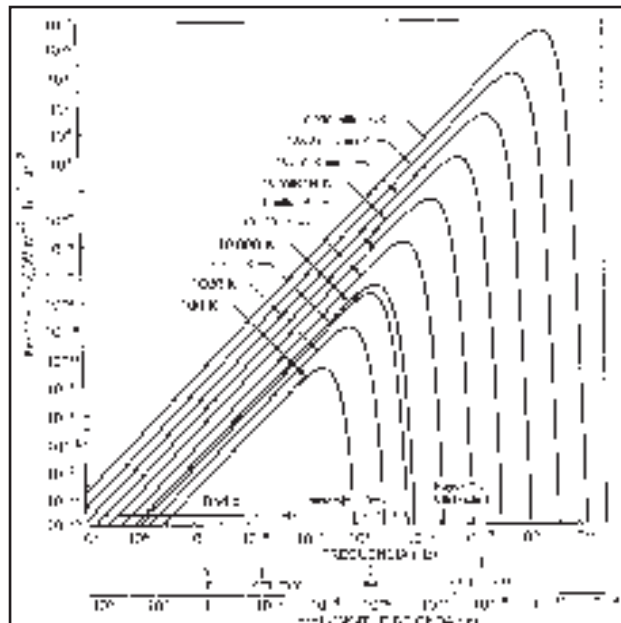
Fig. 4: Distribución del flujo de electrones muy energéticos alrededor de la Tierra, a una altura de 1.000 km. Las líneas indican puntos con flujos similares expresados en electrones por cm^2 y segundo.

universo en rayos X, pues el paso por ella produciría un ruido de fondo innecesario en los detectores. La mejor manera de evitarla es colocar los satélites en órbitas suficientemente próximas al Ecuador y no en órbitas polares, o bien usar órbitas excéntricas en las que la mayor parte del tiempo útil, el satélite encuentre alejado de los cinturones de radiación de alta energía. Todo esto, sin embargo, sólo es un problema para estudios mucho más avanzados que los planteados durante los primeros años.

1.4. ¿Existen realmente los rayos X cósmicos?

Antes de que se descubriera la existencia real de rayos X cósmicos, era posible predecir teóricamente si el Universo emitía cantidades importantes de esta radiación. Una primera aproximación era calcular el espectro de un cuerpo negro a alta temperatura. El cuerpo negro es una aproximación ideal para estudiar las propiedades radiativas de un objeto en equilibrio termodinámico. Cuando la materia se encuentra en equilibrio con la radiación, y existe un balance entre la emisión y la absorción a todas las frecuencias, los objetos emiten radiación electromagnética de acuerdo con su temperatura, siguiendo una serie de leyes físicas conocidas. En particular, el espectro de radiación se ajusta a la llamada distribución de Planck. En la figura 5, presentamos la forma del espectro de radiación continua procedente de diferentes cuerpos negros, según su temperatura. Es fácil ver que el máximo de emisión de un cuerpo en el rango de los rayos X se obtiene para temperaturas del orden de un millón de grados. A la temperatura del Sol, es decir a unos 6.000 K, el pico de emisión se produce en el rango óptico, justo en el que nuestros ojos,

Fig. 5: Curvas de distribución de la intensidad de la radiación según la ley de Planck del cuerpo negro para diferentes temperaturas.



y no por casualidad, son más sensibles. Así podemos aprovechar al máximo el sentido de la visión.

CUADRO I. LA LEY DE WIEN

La longitud de onda a la que se produce la mayor emisión de un cuerpo negro también puede estimarse con la expresión de Wien, según la cual, para una temperatura T (en Kelvin), la longitud de onda a la que se emite mayor cantidad de radiación viene dada por

$$\lambda_{\max} (\text{\AA}) = \frac{0,29 \times 10^8}{T}$$

Es decir, para obtener máximos de radiación electromagnética entre 0,25 y 100 \AA se requieren objetos con temperaturas entre 250 mil y 300 millones de grados.

Sabemos que no existen estrellas con temperaturas superficiales cientos de miles o millones de grados por lo que, si esperamos ver radiación X de origen cósmico, tenemos que suponer la existencia de regiones de otro tipo, muy calientes, en el Universo. Podrían ser nubes de gas a muy alta temperatura, calentadas por ondas de choque propagándose a través del medio interestelar, generadas a su vez en explosiones supernova, o podría ser la caída de materia sobre los polos magnéticos de una estrella de neutrones, calentando las regiones polares a muy alta temperatura y liberando grandes cantidades de energía gravitacional en forma de energía térmica.

Ninguna de estas posibilidades había sido estudiada en los años cuarenta, al principio de la Astronomía X, y los científicos fijaron su atención en el Sol, por su proximidad, como mejor candidato para buscar rayos X fuera de la Tierra. Si, como ocurre en otros rangos del espectro electromagnético, el Sol emite de forma similar a las demás estrellas, es lógico pensar que el flujo de radiación X que nos llegue del Sol sea muy superior al que recibimos de las otras estrellas, mucho más alejadas. Lamentablemente esta hipótesis no era de gran utilidad, ya que las estrellas no iban a ser la fuente principal de radiación X que nos llegaba del Cosmos.

La existencia de fuentes astronómicas de rayos X no se demostró hasta 1948, cuando el estadounidense Burnight pudo medir, utilizando una emulsión fotográfica espacial durante un vuelo por un cohete de sondeo *Aerobee*, la radiación X procedente del Sol. Pronto se vio que el Sol emite en rayos X una energía del orden de un millón de veces menor que la correspondiente al rango óptico. Hoy día sabemos que casi todos los objetos celestes presentan estructuras de emisión y/o absorción de rayos X, según lo han confirmado los resultados obtenidos con los observatorios espaciales más modernos, pero estas estructuras se corresponden

con plasmas muy calientes, en condiciones alejadas de las que se encuentran en una estrella normal como el Sol. El descubrimiento de un Universo totalmente distinto al que conocíamos en el óptico, un Universo «caliente» de rayos X, con objetos que emiten millones de veces más energía en este rango que en longitudes de onda visibles, era totalmente inesperado.

El objetivo de la Astronomía X sería pues, la detección de fuentes débiles, por encima de un fondo de radiación X relativamente intenso. El número de fotones X es tan escaso que, prácticamente, hay que irlos contando uno a uno. Como veremos más adelante, un flujo de 1 fotón/cm²/s observado en la tierra, ¡ya constituye una fuente X cósmica brillante!

1.5. Las primeras medidas

Como hemos dicho, los primeros intentos en detectar rayos X de origen cósmico se centraron en la observación del Sol, por ser la estrella más próxima. Pero además, el interés por detectar los rayos X solares tenía otra componente. Desde hacía tiempo se conocía la existencia de una capa electrificada en la parte más alta de la atmósfera, conocida con el nombre de ionosfera, y los científicos esperaban explicar la ionización de esta región mediante la radiación solar. De hecho se observaba una variación del grado de ionización con la posición del Sol, pero no parecía posible una explicación basada en la radiación visible o, incluso, en la más energética del ultravioleta. Los rayos X solares, de existir, podrían ser la solución, pero la temperatura de la fotosfera solar a unos 6.000 K, no permitía predecir la presencia de una cantidad apreciable de radiación de alta energía. Las primeras pistas de que la situación podría ser diferente vinieron de la observación de la corona solar, un gas muy tenue alrededor del Sol que en realidad es un plasma ionizado a muy alta temperatura, superior a un millón de grados. Este gas podría crear sin problemas los rayos X necesarios y sólo faltaba su detección experimental. Así lo pensaron, al menos, en un grupo de investigación que trabajaba en el Laboratorio de Investigación de la Marina de los Estados Unidos (*United States Naval Research Laboratory*, NRL), de Washington, cuando tuvieron a su disposición una serie de cohetes de sondeo para realizar experimentos científicos e iniciaron sus trabajos en este nuevo campo.

Los primeros cohetes lanzados para medir rayos X cósmicos llevaban a bordo unos simples trozos de película que se exponían para ser impresionados por los fotones energéticos y luego eran recogidos para su análisis. La película se protegía de los fotones menos energéticos mediante una placa de berilio o de aluminio de espesor variable. Conforme mayor era el espesor de las láminas, mayor era la energía de los fotones que las atravesaban. De esta forma se vio que era posible detectar radiación X, pero no identificar su origen fuera de los cinturones de radiación que rodean la Tierra. El primer experimento astronómico en el que se detectó radiación invisible mediante tecnologías basadas en los cohetes de sondeo, puede

considerarse que fue la observación espectroscópica en el ultravioleta del Sol, en 1946, y el mundo de los rayos X, contiguo en el espectro electromagnético, estaba llamado a ser la siguiente ventana en ser abierta para la investigación científica.

Un importante avance en la tecnología utilizada para la detección de radiación X, que permitiría la detección definitiva de la emisión solar, consistió en el lanzamiento de cohetes capaces de transportar contadores tipo Geiger a las capas más altas de la atmósfera y transmitir a tierra los datos recogidos durante los pocos minutos del vuelo, antes de caer nuevamente al suelo. Los contadores Geiger tienen una cámara cerrada con un gas inerte, como argón, neón o xenón, además de algo de metano, y uno o varios hilos conductores en su interior, cargados positivamente, que actúan de ánodo y se mantienen a un potencial de algunos miles de voltios, mientras que la caja que contiene el gas actúa como cátodo. Si un fotón X penetra en la cámara, a través de una ventana transparente, y colisiona con un átomo del gas, puede ser absorbido fotoeléctricamente y liberar un electrón del átomo. Este electrón libre será atraído por el ánodo y sufrirá colisiones adicionales en su recorrido por el gas, que dará lugar a una nube de electrones. Esta avalancha acaba generando, en el hilo conductor, un impulso de corriente que puede ser amplificado y detectado. Si la diferencia de potencial entre los electrodos es suficientemente alta, la corriente producida es independiente de la energía del fotón incidente, siempre que éste haya sido capaz de iniciar el proceso, y el detector se dice que funciona en régimen de saturación. Como un contador de este tipo no proporciona información acerca de la energía de los fotones detectados, los investigadores empleaban ventanas con láminas de material semitransparente a los rayos X, de espesor variable para restringir la energía de los fotones capaces de iniciar el proceso y medir así, de forma aproximada, el espectro de la radiación X.

Con esta sencilla instrumentación, los científicos del mencionado laboratorio (NRL) descubrieron la emisión de rayos X del Sol en 1948-49. Se había conseguido la primera detección de rayos X generados fuera de la Tierra mediante un cohete de sondeo y, en los años posteriores, se analizó en detalle la actividad solar en rayos X y su relación con el ciclo undecenal de las manchas solares. Asimismo se obtuvo la distribución, en función de la longitud de onda, de la energía de emisión X, confirmando que la corona solar era su principal responsable. Más tarde, en 1963, incluso se obtuvo una imagen bidimensional del Sol en rayos X y se observaron líneas de emisión de elementos altamente ionizados de la corona solar con un espectrómetro Bragg, especialmente diseñado para trabajar en este rango de energías. Los trabajos pioneros se llevaron a cabo en el mismo NRL, con una decisiva participación del norteamericano Herbert Friedman, utilizando como cohetes de sondeo lanzadores del tipo V-2 diseñados por los alemanes durante la II Guerra Mundial y versiones similares o mejoradas, desarrolladas en Estados Unidos en los años inmediatamente posteriores a dicha confrontación. Los lanzamientos se llevaban a cabo desde una base situada en White Sands (Nuevo México).

1.6. Los años heroicos

Es interesante recordar un poco del ambiente existente en aquella época entre aquéllos que llevaron a cabo los primeros experimentos espaciales. Estos científicos no eran realmente astrónomos. La Astronomía no era, ni mucho menos, la motivación principal de sus investigaciones. Eran básicamente ingenieros y físicos cuyo interés primordial estaba centrado en la aplicación de sus conocimientos técnicos en algo realmente nuevo. La Astronomía era una excusa como otra cualquiera para desarrollar equipos nuevos y justificar el lanzamiento de cohetes de sondeo por encima de la atmósfera de la Tierra. De hecho, el empleo de la palabra «experimento» para denominar a la carga útil o instrumento de medida, es un ejemplo de las motivaciones profundas de los pioneros de la era espacial que pervive desde esta época inicial. Por supuesto, los instrumentos astronómicos espaciales son en su gran mayoría equipos pasivos y no verdaderos «experimentos». Esta palabra no se usa nunca en los instrumentos ópticos que son instalados en los telescopios en tierra.

Más tarde se unirían los astrónomos, en el sentido clásico, a la aventura espacial. Una de las razones para esta incorporación tardía a un campo que hoy nos parece tan evidente para el desarrollo de la Astronomía, fue la escasa esperanza inicial de obtener resultados innovadores fuera del rango óptico. Los astrónomos sólo tenían realmente un deseo muy confuso de observar en las regiones del espectro para las que nuestra atmósfera no es transparente. Ciertamente, una gran mayoría eran conservadores respecto a la apertura de nuevas líneas de investigación, y la época coincidía con el comienzo de la utilización de grandes telescopios ópticos en tierra, que produjeron una gran acumulación de datos. Esto tampoco recomendaba entrar en nuevas áreas. Por otro lado, existía el convencimiento general, ya mencionado, de que no había ninguna razón para esperar que tuvieran lugar fenómenos realmente interesantes en otras zonas espectrales como indicaba la radiación solar. Una prueba de esta situación es que los primeros pasos de la radioastronomía tampoco fueron dados por verdaderos astrónomos. El estudio de la emisión de ondas radio de origen cósmico comenzó con el esfuerzo de algunos ingenieros de comunicaciones que quedaron disponibles al terminar la II Guerra Mundial, con sofisticados equipos para la época y numerosas posibilidades técnicas. Muy pocos astrónomos en el sentido clásico del término se interesaron en la observación de las ondas radio del Universo en los primeros años.

Pero además de los pocos incentivos mencionados, existía una componente menos científica basada en el temor de los astrónomos de dedicar enormes esfuerzos y gran cantidad de tiempo, al desarrollo de instrumentos y experiencias espaciales para luego no recoger ningún resultado. Este temor estaba muy justificado, debido a la gran cantidad de lanzamientos fallidos y experimentos que no lograban transmitir resultados científicos por problemas de ingeniería, más que por el diseño y preparación del propio instrumento científico. Sin duda era más

provechoso sentarse detrás del telescopio en tierra y tomar datos de forma rápida y fiable. Por todo ello, los primeros científicos espaciales dedicados a la instrumentación astronómica podrían ser considerados más próximos a los astrónomos aficionados que a los profesionales. Tenía que gustarles la aventura. Disfrutaban con la construcción misma del instrumento o con la belleza del lanzamiento de un cohete o un globo estratosférico. La obtención de resultados científicos al final del proceso quizás era considerado como un premio que no siempre era necesario. De hecho, las misiones astronómicas espaciales todavía resultan fallidas hoy en día, total o parcialmente, en muchas ocasiones. Aparte de la misiones *Cluster* y *Mars 96*, perdidas en su totalidad debido a los fallos en los lanzamientos, podemos mencionar el problema óptico del famoso *Telescopio Espacial Hubble*, la órbita de *Hipparcos* o la antena principal de la sonda *Galileo*, habiendo presentado éstos últimos, problemas imprevistos al ser lanzados al espacio.

1.7. Estrellas de rayos X

Por fin se habían detectado rayos X extraterrestres. Pero los resultados obtenidos para el Sol hicieron pensar que no sería posible medir otras estrellas. En efecto, el flujo de rayos X del Sol que nos llega a la Tierra es del orden de $0,04 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$. Suponiendo que todas las estrellas emitan una cantidad similar de radiación X, es fácil calcular que una estrella situada a sólo un parsec de distancia producirá un flujo en la Tierra del orden de $10^{-12} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$. Los detectores de rayos X disponibles en aquella época eran incapaces de medir flujos de radiación tan pequeños y, por tanto, no se podía esperar la detección de ninguna fuente más de rayos X. Expresándolo de otra forma, para detectar fuentes de rayos X dentro de nuestra galaxia, a distancias típicas de unos mil parsecs, necesitaríamos aceptar la existencia de procesos físicos capaces de generar luminosidades en rayos X del orden de unas 3.000 veces la luminosidad integrada del Sol a todas las longitudes de onda, cuando la radiación X del Sol es sólo una millonésima de su luminosidad integrada ¿Existen realmente procesos físicos capaces de generar esta energía? ¿Habrán objetos en el Universo en los que estos procesos puedan tener lugar?

Los astrónomos de la época pensaron en algunos candidatos posibles. Objetos conocidos en el rango óptico que podrían emitir mucha más radiación en rayos X. Ninguno de los grupos de estrellas propuestos resultaron ser grandes emisores de rayos X: las estrellas ráfaga o «flare», las estrellas Wolf-Rayet, las variables cataclísmicas, las novae y las estrellas O calientes. Hoy día se estudia la radiación X de todos estos objetos, como la de muchos otros, por el gran aumento de la sensibilidad de los instrumentos de detección empleados pero, como suele ocurrir en la historia de la Astrofísica, los objetos más brillantes en el cielo de rayos X resultaron ser cierta clase de estrellas (sistemas binarios en realidad), cuya existencia era simplemente desconocida con anterioridad y a las que se les denominó, justamente, estrellas X.

En Estados Unidos, un grupo de científicos formado por los italianos Riccardo Giacconi y Bruno Rossi, junto con Herb Gursky y Frank Paolini, descubrió la primera fuente de rayos X fuera del Sistema Solar el 18 de junio de 1962. Fueron necesarios trece años desde la primera medida de rayos X solares, pues un primer intento resultó fallido en octubre de 1961. Al nuevo objeto se le denominó Scorpius X-1 (= Sco X-1) por encontrarse en la región de la constelación del Escorpión. Lamentablemente no podía saberse mucho más ya que, con la precisión para localizar la posición de las fuentes de rayos X de los detectores, era imposible identificar a Sco X-1 con ningún objeto conocido en el rango óptico. El grupo de Giacconi trabajaba para la Compañía Americana de Ciencia e Ingeniería (*American Science and Engineering Inc.*, AS&E), y llevaba a cabo investigaciones por encargo de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Ya habían realizado algunos trabajos secretos con cohetes de sondeo encaminados a la detección de explosiones nucleares, muy de moda en aquella época por la preocupación existente acerca de las experiencias que estaba realizando la -por entonces- Unión Soviética pero, en esta ocasión, el experimento estaba diseñado, al menos oficialmente, para estudiar la fluorescencia lunar en rayos X, por lo que el descubrimiento de una fuente cósmica de este tipo de radiación puede considerarse como fortuito. Para el experimento se empleó el cohete *Aerobee* (el 150), que se muestra en la figura

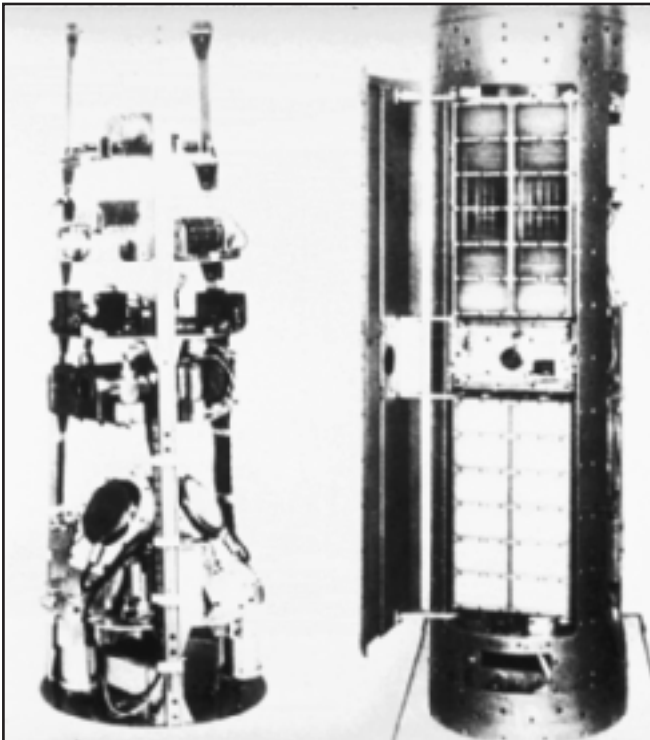


Fig. 6: La instrumentación a bordo del cohete de sondeo Aerobee 150 que permitió el descubrimiento de la primera fuente extrasolar, Scorpius X-1.

6, equipado con tres contadores Geiger (así llamados en honor de su inventor, el alemán Hans Geiger), cada uno de los cuales tenía una ventana con una lámina de mica de diferente espesor, y las distintas zonas del cielo eran barridas gracias a la rotación de la carga útil alrededor del eje principal. El lanzamiento -que llevó al cohete a 225 km de altura- fue un gran éxito al ser detectada Sco X-1, la fuente más brillante del cielo en rayos X (con la excepción del Sol en periodos de gran actividad). La detección se produjo ya cuando el ingenio iba a 80 km de altura (figura 7). Sco X-1 era tan brillante que se llegó a dudar del funcionamiento de

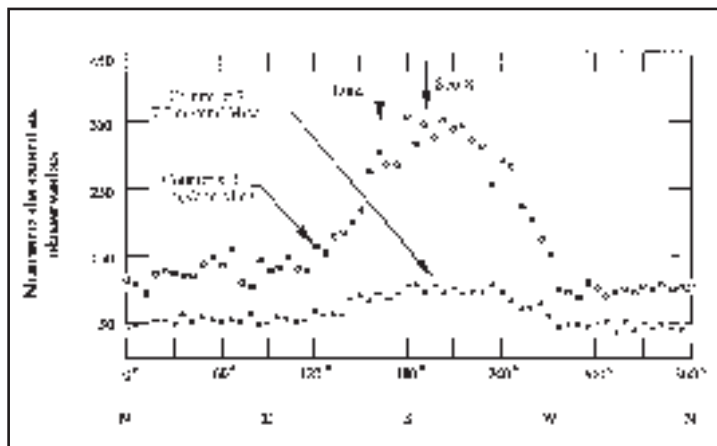


Fig. 7: Distribución azimutal de rayos X medida con el contador Geiger, a través de dos ventanas de mica de diferente espesor, instalado a bordo del Aerobee 150. La señal de Sco X-1 es máxima para 195° de azimut.

los equipos. Además, también se descubrió un intenso fondo de radiación de rayos X proveniente de todo el cielo, es decir, incluso observando en direcciones donde no hay fuentes de rayos X, se detectó un flujo pequeño pero significativo de radiación X no atribuible a fuentes transitorias como rayos cósmicos o erupciones solares. Este fondo difuso recibió el nombre de Radiación de Fondo de Rayos X y su brillo integrado a todo el cielo es incluso superior al del Sol. Rápidamente se atribuyeron características cosmológicas a esta radiación y su interpretación mantiene activos a los astrofísicos, sin descanso, desde entonces. Hoy se sabe que es -en gran manera- producido por multitud de débiles fuentes extragalácticas. En cualquier caso, y siguiendo con la historia, un nuevo vuelo en junio de 1963 confirmó plenamente los resultados obtenidos.

1.8. Nuevos objetos emisores de rayos X

La primera preocupación que surgió entre los científicos al ver que, efectivamente, existían fuentes de rayos X cósmicas, fue cómo identificar los objetos responsables de dicha emisión. Esto era fundamental para poder averiguar el tipo de proceso físico capaz de producir tales niveles de radiación de alta energía. De hecho, en octubre del mismo año 1962, cuando debido a su cercanía aparente al Sol no era visible en el cielo la fuente intensa Sco X-1, se detectaron con una

instrumentación similar dos nuevas fuentes de rayos X sin saber cuál era el tipo de objeto emisor. Una de ellas en Cygnus (Cyg X-1) y la otra localizada en las cercanías de Taurus. A cambio, en 1963, el grupo del NRL encabezado por Herbert Friedman detectó de manera más precisa la radiación X de la fuente de Taurus (Tau X-1), «cercana» a la nebulosa del Cangrejo, que era conocida en el óptico desde finales del siglo XVIII como el residuo de una supernova que explotó en el 1054 según nos han hecho llegar los astrónomos chinos de aquellos entonces. La identificación de la emisión X con la conocida nebulosa fue realizada por el grupo del NRL al que también pertenecía el norteamericano Stuart Bowyer, gracias a la observación de la disminución del flujo observado conforme la propia Nebulosa del Cangrejo (= Tau X-1) iba siendo ocultada por la Luna. Era la primera vez que se identificaba de forma fiable una fuente de rayos X con un objeto concreto conocido y, el análisis del eclipse, permitió además hacer la primera estimación del tamaño angular de una fuente de rayos X. El tema de la Astronomía X se empezaba a poner interesante, pero había que mejorar la sensibilidad de los detectores y, sobre todo, tratar de localizar con mayor precisión a las fuentes de rayos X en el cielo, para identificar un número suficientemente representativo con objetos de los cuáles tuviéramos más información en el visible.

CUADRO II. NOMENCLATURA DE LAS FUENTES X.

En los años sesenta, conforme se iban descubriendo las nuevas fuentes de rayos X, iban recibiendo el nombre según la constelación en la que se encontraban. Por ejemplo *Scorpius X-1*, o *Sco X-1* (o *Sco XR-1*) fue el primer objeto descubierto en rayos X en la constelación homónima. Las siguientes fuentes serían llamadas *Sco X-2*, *Sco X-3* y así sucesivamente. Pero a medida que se fue desarrollando la Astronomía X, el número de objetos detectados -como veremos-, se iba a ir multiplicando y esta nomenclatura resultaría insuficiente a todas luces. Se adoptó pues la forma que aún prevalece hoy en día y por la cual se emplea una combinación de letras y/o números (hasta cuatro), seguido de dos conjuntos de números que representan la ascensión recta y declinación del propio objeto, es decir su posición aparente en la esfera celeste. Por ejemplo: *4U 2129+47* es la fuente del cuarto catálogo de Uhuru que se encuentra a A.R. (1950) = 21° 29', Dec (1950) = +47°. Y *1SAX J0653 + 7917* es la fuente observada por BeppoSAX que se sitúa a A.R. (2000) = 06 h 53 m, Dec (2000) = +79° 17' (la *J* se refiere al equinoccio del año 2.000). Eso sí, si el objeto emisor en X era ya conocido con anterioridad, como una galaxia (NGC 4151), una estrella variable (V 404 Cyg) o un objeto de cualquier otro catálogo peculiar (SS 433), estos conservan sus nombres antiguos a pesar de que tengan otra denominación en los catálogos de rayos X. Por ejemplo, nadie se refiere a la fuente X coincidente con la radiogalaxia Cen A como 4U 1322-42.

Lo primero que se hizo para mejorar los detectores de rayos X fue introducir un factor de colimación, lo que ya habían realizado los grupos de AS&E, NRL y Lockheed a principios de los 60. Al principio, los detectores simplemente «miraban» al cielo a través de la ventana del contenedor de gas presurizado y aprovechaban la rotación del experimento sobre un eje para barrer distintas zonas del cielo. Pero pronto se introdujo una estructura mecánica muy sencilla que consistía en una red de láminas metálicas de material opaco a los rayos X colocada en forma de rejilla encima del detector. La idea era limitar el campo de visión a unos pocos grados, y que se pudiera localizar más fácilmente la fuente emisora (ver figura 8). Era algo parecido a poner orejeras a un caballo para limitar su campo de visión al camino que ha de seguir. De esta forma se obtenían campos de visión limitados a unos pocos grados. Para una mayor precisión, era necesario seguir aprovechando las posibles ocultaciones de las fuentes de rayos X por la Luna.

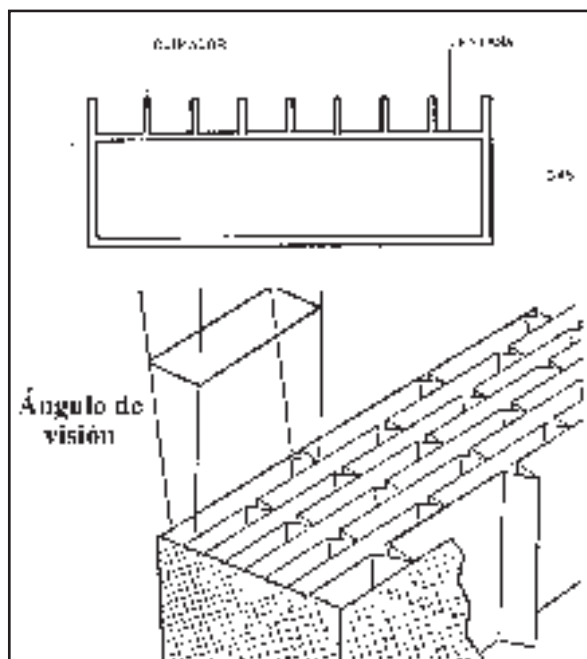
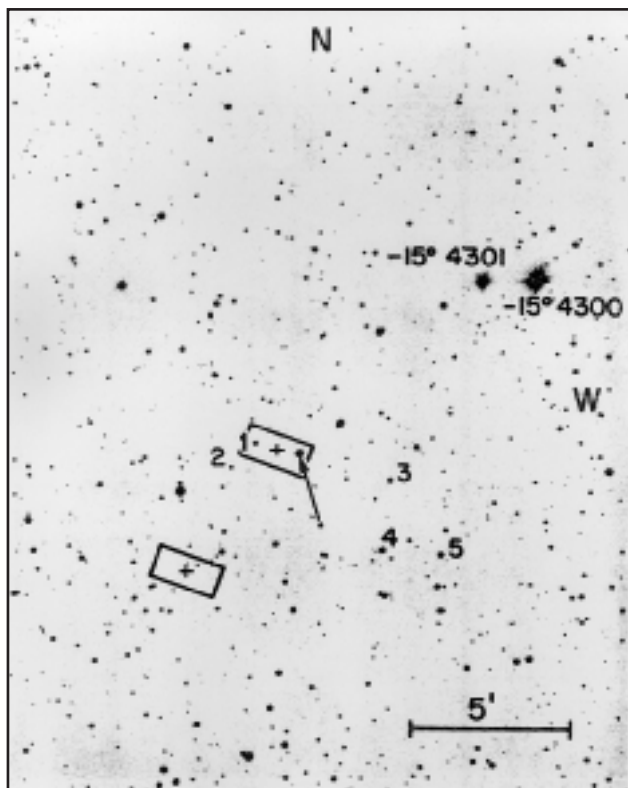


Fig. 8: Esquema de un contador de rayos X con un sistema de colimación mecánica sobre la ventana del detector. En la figura inferior se muestra la estructura de rejilla con un campo de visión rectangular.

El japonés Minoru Oda que trabajaba con el grupo del Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT) desarrolló en 1964, una nueva técnica que se basaba en el uso de un colimador en el que un elemento mecánico obstruía parte del flujo de la fuentes X, y permitió refinar en gran manera la posición de Sco X-1, de modo que la estrella muy azul de magnitud 13 (figura 9) descubierta desde el Observatorio de Tokio, fue confirmada definitivamente como la contrapartida óptica de dicha fuente. Dicho sea de paso, el espectro obtenido en el óptico del objeto era bastante inusual. Fue por entonces -1966- cuando los soviéticos Igor Novikov

Fig. 9: La flecha señala la «estrella» azulada de magnitud 13 que es la contrapartida óptica de Sco X-1. La posición es A.R. (2000) = 16h 19m 55s Dec (2000) = -15° 38' 22". Los rectángulos indicaban las dos posibles localizaciones de la fuente X. De A. Sandage y colaboradores, *Astrophysical Journal* 146, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, p. 316 (1966).

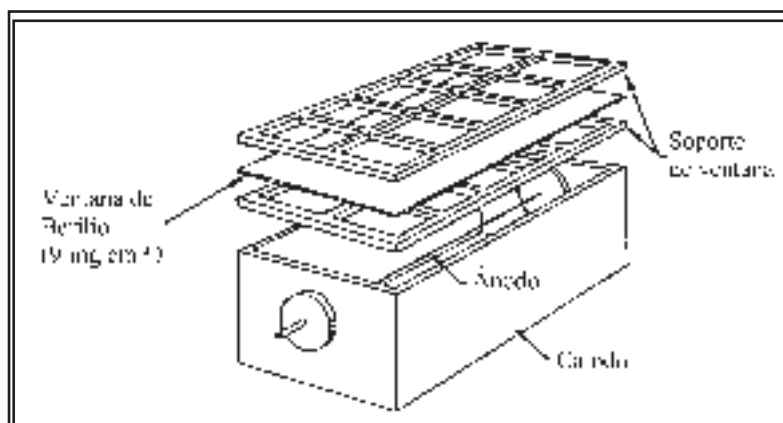


y Jacob B. Zeldovich, conjuntamente con su compatriota Iosif S. Shklovsky -al año siguiente- propusieron que la fuente de energía que alimenta Sco X-1 no es otra que la energía potencial gravitacional que se libera cuando cierta cantidad de masa se vierte de una estrella normal a un objeto colapsado, como es una estrella de neutrones. Así pues, pronto se aceptó que Sco X-1 era un sistema binario en el que se transfiere masa de una estrella normal a una estrella de neutrones que gira a su alrededor.

Además de los colimadores, se incorporaron nuevas técnicas en los clásicos contadores tipo Geiger. Mejor que emplear diferentes láminas en las ventanas de las cámaras de gas de los contadores, era reducir el potencial en los hilos conductores del ánodo hasta un nivel en el que la corriente producida fuera proporcional a la energía del fotón incidente responsable de la avalancha de electrones sobre el ánodo. Es decir, eliminar el régimen de saturación manteniendo la diferencia de potencial necesaria para que tenga lugar el proceso fotoeléctrico y mejorar los sistemas electrónicos de amplificación y medida de la señal. Estos contadores Geiger modificados se llamaron, lógicamente, contadores proporcionales y también utilizaron láminas delgadas en la ventana, pero solamente para limitar los fotones que penetran en el gas, dentro de un margen de energías más o menos amplio. Mediante los sistemas electrónicos auxiliares se podía contar el número

de fotones X que se iban recibiendo con energías dentro de unos rangos estrechos, o bandas seleccionadas previamente, y determinar de forma aproximada el espectro de la radiación X detectada. En la figura 10 mostramos el esquema de un contador proporcional típico. Desgraciadamente, los contadores proporcionales

Fig. 10:
Esquema de
un contador
proporcional de
rayos X.



no sólo son activados por fotones X sino también por partículas cargadas. Esto quiere decir que los contadores proporcionales sufren un alto nivel de ruido de fondo, debido a la avalancha de electrones sobre el ánodo que pueden producir los rayos cósmicos, o las perturbaciones por partículas cargadas del cinturón de radiación que circunda la Tierra. Por ello, los experimentos astronómicos que utilizan contadores proporcionales de rayos X deben evitar en lo posible las regiones de mayor densidad de partículas energéticas, adoptando órbitas ecuatoriales, e incorporar técnicas de procesamiento de la información que reduzcan lo más posible el mencionado ruido de fondo. Un método empleado a veces es instalar, junto al contador proporcional, un contador de partículas cargadas y rechazar las medidas de rayos X que coincidan en el tiempo con la detección de una partícula. Esto es lo que se conoce como un sistema de protección por anticoincidencia, ya que el experimento ignora detecciones que coindidan en los dos detectores.

Además de los grupos mencionados de Friedman (NRL), Giacconi (AS&E) y Rossi y Clark (MIT), otros equipos se incorporaron pronto a la exploración del cielo en rayos X, como el de Philip Fisher en el Laboratorio de Investigación Lockheed en Estados Unidos o la Universidad de Leicester en el Reino Unido. Todos empleaban cohetes de sondeo y rápidamente mejoró la tecnología de los detectores y la estabilización de los propios cohetes, siendo posible la instalación de subsistemas de apuntado con cierta precisión para centrar las medidas en objetos concretos y emplear el mecanismo de colimación para reducir el ruido de fondo procedente de otras fuentes próximas. En la figura 11 mostramos un esquema típico de un instrumento para la medida de rayos X mediante cohetes de sondeo, compuesto de un colimador y un detector que, a su vez tiene el contador

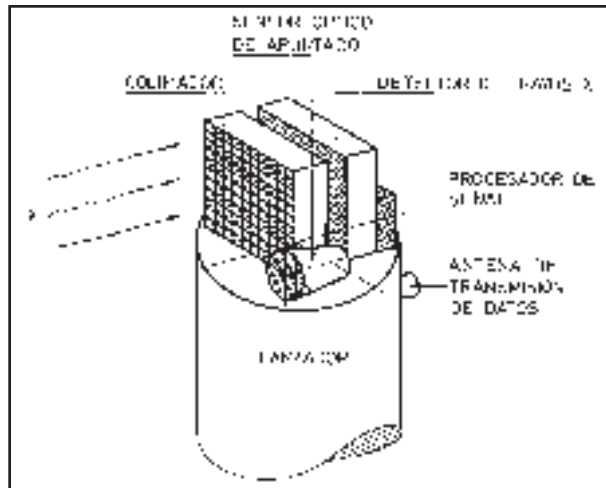


Fig. 11: Esquema de funcionamiento de un instrumento típico (en este caso un contador proporcional) a bordo de un cohete de sondeo.

de fotones y una ventana de limitación del rango de energías. El instrumento se completa con un sensor óptico de la posición, un procesador de la señal recibida y un sistema de transmisión de los datos a tierra. Con estos diseños tan simples se descubrieron a lo largo de los años sesenta hasta una treintena de fuentes puntuales de rayos X y se identificaron algunas de ellas con objetos conocidos en el óptico. Entre estas fuentes identificadas ya hemos mencionado el caso de la nebulosa del Cangrejo, pero otro ejemplo interesante fue la galaxia activa M87 que en 1966 fue el primer objeto en ser descubierto como fuente de rayos X fuera de nuestra propia galaxia. Sin duda tenían que existir mecanismos tremendamente potentes en el Universo, capaces de emitir tan gran cantidad de energía en rayos X como para ser detectados objetos extragalácticos. La Astronomía X empezaba a ser no sólo interesante para el mundo de los astrofísicos sino realmente imprescindible para hacerse una idea global de los fenómenos que se producen en el Universo. Un año después apareció en el cielo un objeto que rivalizaba con el mismo Sco X-1, que fue bautizado como Cen XR-2 (= Centaurus XR-2 = Cen X-2), el primero de la clase de las llamadas Novas de Rayos X, aunque su comportamiento no tiene relación alguna con las novas clásicas.

1.9. La situación al terminar los años sesenta

En 1970, después del lanzamiento de varias docenas de cohetes de sondeo, que acumularon sólo unas cuantas horas totales de observación, se habían obtenido pruebas irrefutables de la existencia de un Universo violento con temperaturas altas y capaz de emitir grandes cantidades de radiación X. Lamentablemente, la baja resolución angular de los detectores no permitía la identificación con objetos conocidos en otros rangos espectrales de muchas de las fuentes observadas de rayos X. Había que esperar a tener instrumentos en órbita para poder llevar a cabo

experimentos más complejos, no limitados por el tiempo de vuelo de un cohete de sondeo, entre 5 y 10 minutos. Sin embargo, a pesar de los escasos medios de observación disponibles se habían conseguido importantes resultados antes de finalizar la década: se habían detectado más de cuarenta fuentes individuales; se había descubierto la existencia de un fondo difuso e isótropo de radiación X; se había identificado la fuente más brillante de rayos X no solares (Sco X-1) en el óptico con una estrella azul de espectro peculiar y líneas de emisión; se había localizado la nebulosa del Cangrejo, mediante ocultaciones lunares, como una fuente brillante y extensa, no puntual, de rayos X; incluso se detectó posteriormente la emisión variable del púlsar que reside en el centro de la nebulosa; se había descubierto la existencia de fuentes transitorias de rayos X, que durante un breve tiempo, podían ser tan brillantes como Sco X-1; se detectó la emisión de rayos X de la galaxia M87 en el cúmulo de la Virgen; se observó una erupción tipo ráfaga en la fuente intensa Sco X-1; se recogió el flujo de la primera Nova de rayos X, se observó emisión X procedente del centro de la galaxia e, incluso, se midieron rayos X procedentes de objetos tan lejanos como la galaxia peculiar NGC 1275 en el cúmulo de Perseo, el núcleo de la radiogalaxia gigante Cen A (Centaurus A = NGC 5128) o el cuásar 3C 273.

Mientras tanto, el empleo de globos estratosféricos había dado escasos resultados, ya que los rayos X sólo eran suficientemente penetrantes a muy alta energía. A la altura de 40 km a la que vuelan este tipo de globos, sólo los rayos X con energías superiores a los 20 keV penetran la atmósfera residual hasta alcanzar los detectores, y estos rayos X «duros» son menos abundantes que los rayos X «blandos». Por el contrario, los globos pueden llevar equipos pesados a bordo en vuelos de más de 10 horas y, esta posibilidad de hacer observaciones mucho más largas que con los cohetes de sondeo, compensaba parcialmente las limitaciones impuestas por la absorción atmosférica, permitiendo algunas medidas interesantes a principios de los años sesenta. Por ejemplo, se pudo detectar que la nebulosa del Cangrejo también tenía una importante componente de emisión de rayos X de alta energía. Desde el punto de vista de los detectores, sin embargo, nos encontramos con un nuevo problema: los fotones de rayos X muy energéticos no pueden ser estudiados mediante sistemas de conteo proporcional basados en la interacción con los átomos de un gas, ya que la probabilidad de que un fotón sea absorbido por el gas decrece con la energía del fotón. Para observar a energías altas, es preciso emplear los llamados contadores de centelleo (o centelladores). Estos instrumentos utilizan una estructura cristalina, generalmente yoduros, bien de sodio (NaI) o de cesio (CsI) para detectar los fotones de rayos X que producen una breve ráfaga de luz al pasar por ella. Los destellos de luz, cuya intensidad es proporcional a la energía del fotón incidente, se pueden medir empleando un sistema de fotomultiplicadores o de fotodiodos que funcionan en los rangos visible y ultravioleta próximo. De ellos hablaremos en el próximo capítulo.

CAPÍTULO 2

II LOS PRIMEROS SATÉLITES

2.1. Los primeros experimentos a bordo de satélites

Las experiencias con cohetes de sondeo habían puesto de manifiesto la necesidad de realizar observaciones desde satélites en órbita alrededor de la Tierra. Incluso antes de finalizar la década de los años sesenta, se comenzaron a instalar equipos para la detección de rayos X utilizando, para ello, satélites como los de la serie norteamericana *OSO (Orbiting Solar Observatories)* dedicados al estudio del Sol. Cada uno de estos satélites tenía un eje apuntando permanentemente al Sol, alrededor del cual rotaba la plataforma espacial proporcionando una estabilización giroscópica. En esta sección se podían acomodar fácilmente instrumentos para observar otras partes del cielo, situadas en el plano perpendicular a la dirección del Sol, y de esta forma se podían barrer sectores circulares de la esfera celeste cubriendo todo el cielo en seis meses. El 8 de marzo de 1967 se lanzó la misión *OSO-3* (figura 12), en la que se había instalado un instrumento para la medida de rayos X duros procedentes de la radiación difusa de fondo que funcionó hasta 1968. El 18 de octubre de 1967 se lanzó el *OSO-4* que funcionó hasta mayo de 1968 y posteriormente, el 22 de enero de 1969, se lanzó el satélite *OSO-5* que funcionó hasta 1972. El detector a bordo del *OSO-3* estaba basado en un sistema con una capa de yoduro de sodio (NaI), y otra de yoduro de cesio (CsI), que le permitía detectar radiación X en el rango entre 7 y 210 keV, con un campo de visión de 23°. Hizo un estudio de todo el cielo, observando mayoritariamente emisiones solares. El sistema a bordo del *OSO-5* era un contador de centelleo de CsI que detectaba rayos X aún más energéticos, hasta 254 keV. Con esta misión se obtuvo, por primera vez, un espectro de la radiación difusa de rayos X en el rango de alta energía (14-200 keV) y se trazó un mapa de todo el cielo de dicha radiación comprobándose que era isótropa, dentro de un margen de error del 4% del flujo.

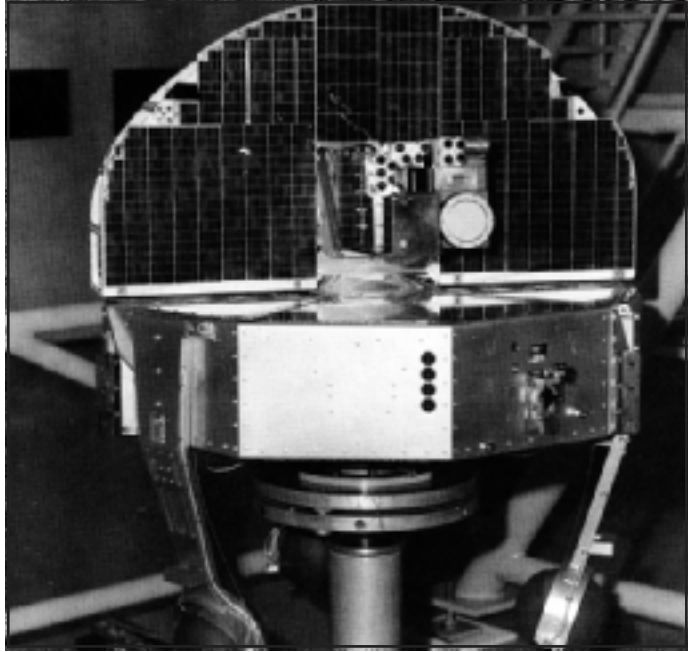


Fig. 12: La misión OSO-3.

Entre las misiones de la serie norteamericana *OGO* (*Orbiting Geophysical Observatories*), la *OGO-5*, lanzada el 4 de marzo de 1968, incluía un experimento para la detección de radiación de alta energía y fulguraciones solares en el rango 10-150 keV. Funcionó hasta agosto de 1971.

Otro caso similar de utilización de misiones, cuyo objetivo principal no era la Astronomía X, sino instalar ciertos instrumentos de medida, fue la serie de satélites Vela (llamados así por la palabra española *velar*). Estos satélites de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, que llevaban a cabo misiones clasificadas como secretas, estaban diseñados para la detección desde el espacio de explosiones nucleares en tierra, en especial para comprobar que la Unión Soviética cumplía el tratado de no proliferación de armas nucleares, firmado en 1963. En ellos se instalaron detectores de erupciones de rayos X en cuatro ocasiones: en los satélites *Vela 5A* y *5B*, lanzados conjuntamente el 23 de mayo de 1969 (figura 13) y en las misiones *Vela 6A* y *6B*, lanzadas el 8 de abril de 1970. Estos detectores se basaban en contadores de centelleo de NaI(Tl) de 1 mm de espesor, con colimadores para delimitar el campo de visión a $6^\circ \times 6^\circ$. Cada instrumento operó aproximadamente un año, excepto el instalado en el 5B, que estuvo transmitiendo datos científicos hasta 1979. Gracias a esta longevidad, se pudo medir todo el cielo en el rango de energías entre 3 y 12 keV y registrar numerosas fuentes de rayos X (persistentes unas y transitorias otras). También portaban detectores de rayos gamma, de modo que detectaban fotones entre 150 y 750 keV. Así fue posible detectar un total de 73 fuentes que durante unos segundos emitían ingentes cantidades de rayos gamma para después no de-

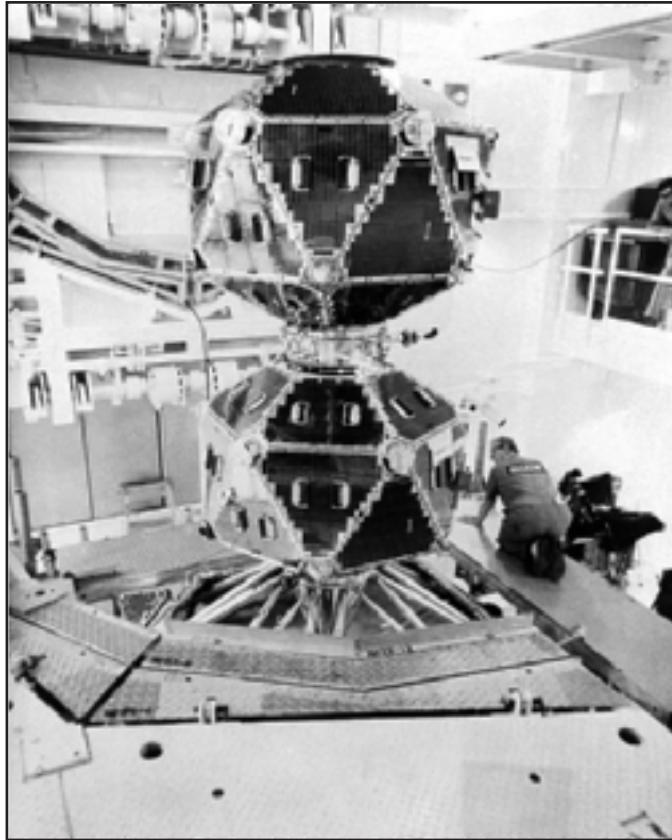


Fig. 13: Los satélites Vela 5A y 5B que se situarían a 180° uno de otro en su órbita alrededor de la Tierra.

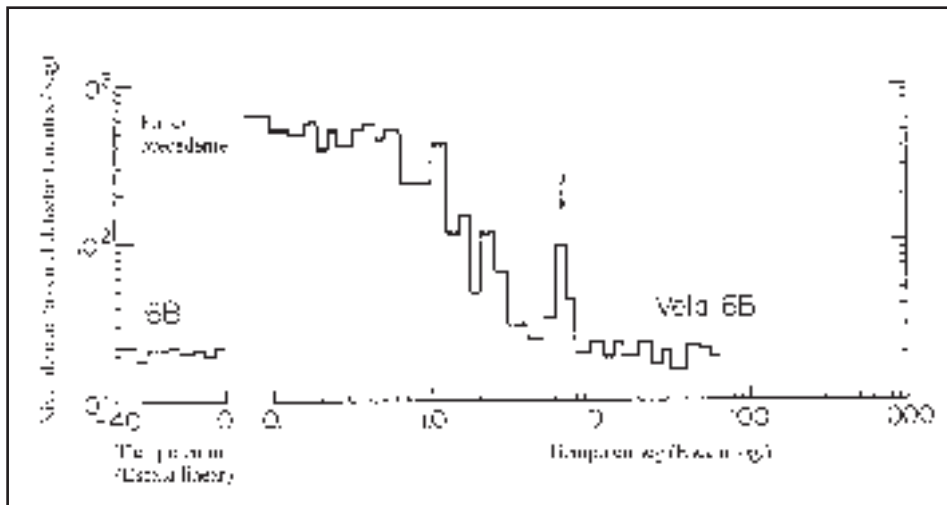


Fig. 14: Una de las primeras explosiones de rayos gamma detectadas por las naves de la serie Vela. De R. Keiblesadel, I. Strong and R. Olson, *Astrophysical Journal* 182, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, L85 (1973).

jar rastro alguno (figura 14). En dos casos también se vio que la emisión gamma estaba acompañada de emisión X. Hoy en día siguen siendo uno de los mayores misterios de la Astrofísica. En el caso de los sistemas recurrentes, el mismo objeto puede volver a emitir rayos X sin previo aviso y los intervalos de tiempo entre dos erupciones de este tipo suelen ser de varios años. El registro sistemático de estas fuentes es muy importante para poder estudiar su historia y variaciones del flujo X a lo largo de periodos de tiempo de varias décadas, como estudiaron los norteamericanos Bill Priedhorsky y Jim Terrel. Entre los descubrimientos realizados por las misiones *Vela 5* y *Vela 6* cabe resaltar la detección de la fuente transitoria brillante Centaurus X-4 (Cen X-4), que pudo ser observada durante las fases de ascenso y disminución de brillo. También el descubrimiento de una periodicidad de unos 300 días en la emisión de rayos X de Cyg X-1, así como de una variabilidad rápida y sin periodo definido en el flujo de rayos X, lo que llevó a una búsqueda mediante cohetes y observaciones ópticas de la contrapartida óptica.

Mientras tanto, también se pusieron en órbita una serie de pequeños satélites soviéticos de la serie *Cosmos* que, presumiblemente, llevaron a cabo experiencias de rayos X, como es el caso de las misiones *Cosmos 208* (lanzada el 21 de marzo de 1968) y *Cosmos 215* (lanzada el 19 de abril de 1968). Esta última operó durante tres meses detectando emisión X tanto solar como de origen cósmico. Siguió *Cosmos 262* (lanzada el 26 de diciembre de 1968), que llevaba un monitor de rayos X y funcionaría hasta julio del año siguiente, y *Cosmos 264* (lanzada el 23 de enero de 1969).

En la misma época, la Organización Europea para la Investigación del Espacio, ESRO, precursora de la actual Agencia Espacial Europea, ESA, también llevó a cabo algunos experimentos de rayos X utilizando el satélite *ESRO-2B* o *Iris* (*International Radiation Investigation Satellite*) diseñado para el estudio de las partículas energéticas emitidas por el Sol (figura 15). ESRO-2B fue lanzado con

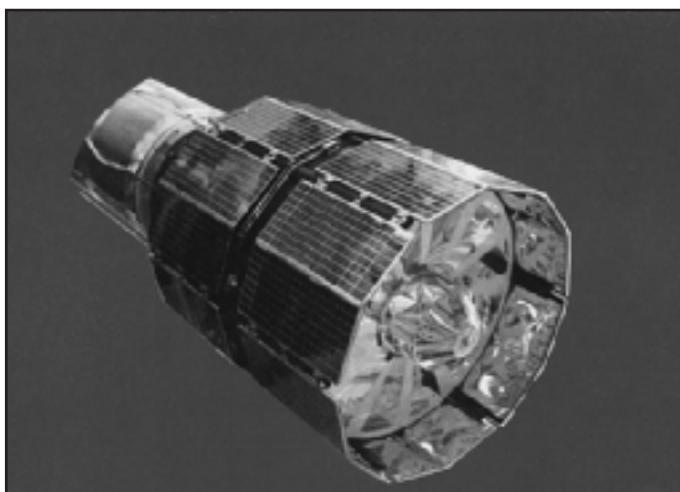


Fig. 15: El satélite europeo ESRO-2B (*Iris*).

un cohete *Scout* el 17 de mayo de 1968 y pudo medir rayos X cósmicos hasta el fallo del sistema de almacenamiento de datos de la misión, en diciembre de ese año. Lo más interesante de esta misión, fue quizás la realización de un proyecto verdaderamente internacional que abriría el camino a nuevas iniciativas de investigación mediante la cooperación entre varios países y, en concreto, al desarrollo del primer satélite europeo de rayos X: el *Exosat*, al que aún le quedaba más de una década por aparecer en escena.

2.2. La misión *Libertad*

La verdadera apertura, sin embargo, de la ventana de los rayos X a la Astronomía tuvo lugar con el lanzamiento del satélite *SAS-1* expresamente dedicado al estudio del cielo en este rango de energías. La agencia norteamericana NASA utilizó un lanzador *Scout* para su puesta en órbita desde la plataforma italiana de San Marco, en Malindi, en la costa de Kenia. El lanzamiento se produjo el día de la Independencia de este país y, por ello, el satélite también se empezó a llamar, de forma no oficial, *Uhuru*, que en swahili quiere decir «libertad», nombre con el que es más conocido aún hoy. El satélite *SAS-1* (*Small Astronomical Satellite*) era el primero de una serie de tres pequeños satélites: el *SAS-2* se dedicó al estudio de la radiación gamma y el *SAS-3* midió nuevamente la radiación X. Todos ellos se englobaron dentro del programa de la NASA de misiones *Explorer*, siendo de hecho *Uhuru* el *Explorer-42*. El lanzamiento de un satélite de estas características había sido propuesto a la NASA por Giacconi y su grupo ya en 1964, como continuación a sus experiencias con cohetes que hemos comentado anteriormente. La misión fue aprobada a finales de 1966 y se lanzó el 12 de diciembre de 1970.

Es interesante recordar que la continuación de esta serie de pequeños satélites fue el observatorio ultravioleta *IUE* (*International Ultraviolet Explorer*), también conocido como *SAS-4*, y que fue lanzado en colaboración con la Agencia Espacial Europea y el Reino Unido en 1978 para explorar el Universo en longitudes de onda ultravioleta. El *IUE* siguió operativo hasta el 30 de septiembre de 1996, después de más de 18 años de éxito científico, y es una muestra clara de la importancia para la astrofísica espacial de este tipo de misiones relativamente pequeñas.

En la figura 16, presentamos un esquema de *Uhuru*. Este satélite pionero de la Astronomía X tenía un módulo de servicio, con los sistemas de control y transmisión de datos así como los paneles solares, y una carga útil con los detectores de rayos X. El satélite pesaba unos 68 kilos y giraba sobre sí mismo una vez cada 12 minutos, lo que le permitía observar todo el cielo de forma sistemática. Para minimizar el efecto sobre el ruido de fondo de las partículas cargadas que se encuentran atrapadas en los cinturones de radiación de la Tierra, la órbita casi circular a 540 km de altura del satélite era prácticamente ecuatorial. Precisamente por eso se utilizó para el lanzamiento la base de Malindi en Kenia. Las medidas se hacían

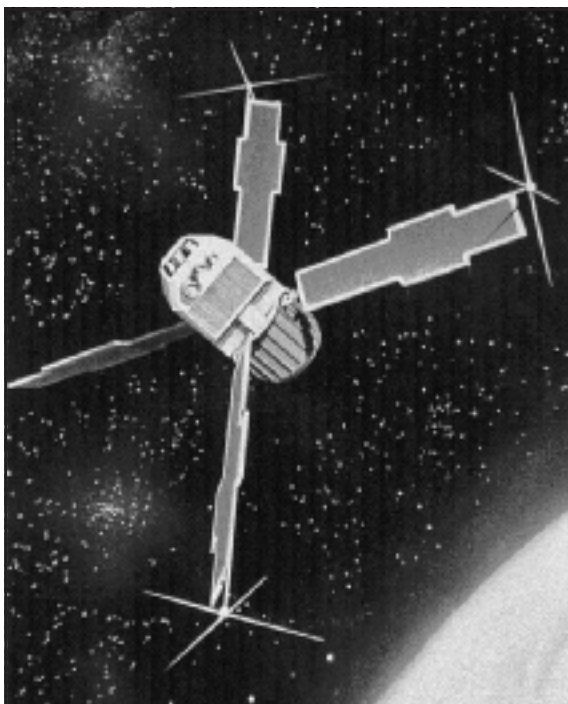


Fig. 16: El satélite SAS-1 (Uhuru).

con dos contadores proporcionales sensibles en el rango de energías entre 2 y 20 keV, usando gas argón, con una capacidad de medir flujos de radiación mucho más débiles que cualquier instrumento anterior, hasta una milésima parte de 1 Crab, que así se denomina a la unidad de flujo en rayos X, que es el flujo detectado en la nebulosa del Cangrejo, que se toma como patrón por su constancia (un «Crab» equivale a 3×10^{-8} erg/cm/s en el rango de energías de 2 a 20 keV). Los detectores de rayos X de *Uhuru* tenían además un sistema de colimación que delimitaba el campo de visión, de forma rectangular de $0,5^\circ \times 5^\circ$ en un caso y cuadrada de $5^\circ \times 5^\circ$ en el otro, para mejorar la resolución angular y, por tanto, obtener una mejor localización de las fuentes de rayos X observadas.

El catálogo final generado por *Uhuru*, al terminar la misión en marzo de 1974 y hacer un análisis detallado de toda la información disponible, contenía 339 objetos (los mostrados en la figura 17). Muchos de ellos estaban concentrados a lo largo del plano de nuestra galaxia, siendo pues en su mayor parte sistemas binarios o restos de explosiones de supernovas, pero el resto se encontraban distribuidos homogéneamente por la esfera celeste, como cabría esperar de fuentes extragalácticas y, de hecho, eran fundamentalmente galaxias Seyfert y cúmulos de galaxias. Se confirmaba así el hecho inesperado de que una contribución importante a la emisión de rayos X cósmicos proviene de objetos muy alejados, lo que exige reconocer la existencia de procesos físicos extremadamente energéticos.

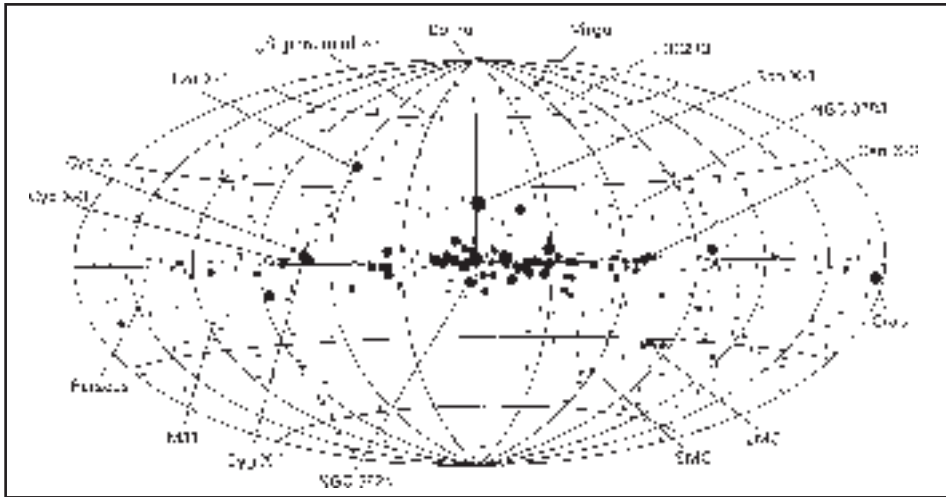


Fig. 17: Distribución en coordenadas galácticas de las fuentes de rayos X encontradas por SAS-1. EL tamaño de los puntos es proporcional a la intensidad de la fuente. Nótese la abundancia de fuentes en torno al centro galáctico.

Las fuentes detectadas se podían estudiar, además, durante periodos de tiempo relativamente largos, en vez de los escasos minutos que duraban los experimentos mediante cohetes. Por primera vez se detectó la existencia de fuentes variables. Dos de estas fuentes (Centaurus X-3 y Hercules X-1) presentaban variaciones totalmente regulares, con periodos de 4,8 y 1,2 s respectivamente, cuando se descubrieron en 1971 (ver figura 18). Eran los primeros púlsares de rayos X. Además, la disminuciones regulares del flujo X cada 2,1 días en Cen X-3 y cada 1,7 días en Her X-1 revelaban la presencia de eclipses, por lo que ya no había duda de la naturaleza binaria del sistema. En estos sistemas, la radiación X se genera en el proceso por el cual la materia es engullida por una de las componentes, generalmente una estrella de neutrones o, incluso, un agujero negro.

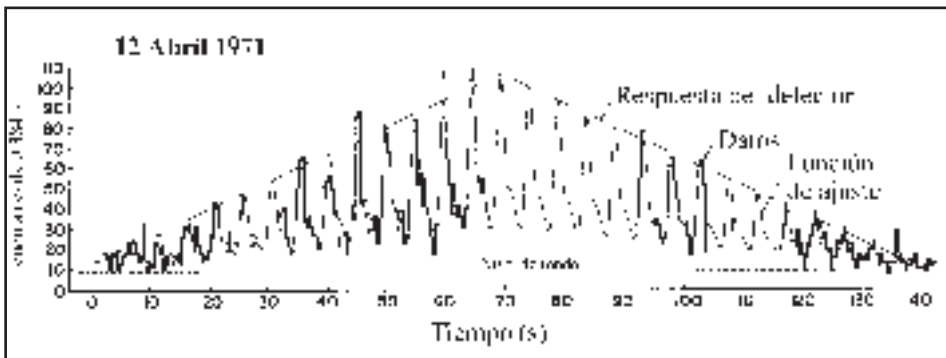


Fig. 18: El descubrimiento del primer púlsar de rayos X, Centaurus X-3. De R. Giacconi et al., Astrophysical Journal, 167, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, L67 (1971).

Sin duda el estudio de los sistemas binarios de rayos X puede considerarse como la mayor aportación científica del *SAS-1* aunque hubo muchas otras. Entre ellas, la creación del primer catálogo homogéneo de fuentes emisoras de rayos X o la demostración de que la variabilidad era un fenómeno usual en este rango de altas energías. Había comenzado una segunda generación de misiones astronómicas para el estudio del Universo en rayos X, dejando atrás la época de los cohetes de sondeo, que desembocaría en todo un mundo nuevo de objetos exóticos y visiones violentas de otros ya conocidos. Los resultados de la misión *Uhuru*, no sólo la convirtieron en la pionera de la Astronomía X, sino que introdujeron esta ventana espectral, a partir de entonces, como una fuente de información imprescindible en el contexto general de la Astrofísica moderna.

2.3. Otros experimentos de rayos X contemporáneos con *Uhuru*

Ya hemos comentado como algunas misiones soviéticas de la serie *Cosmos* (satélites militares) fueron utilizadas para realizar pequeños experimentos de rayos X. Durante la vida operativa de *Uhuru*, se siguieron aprovechando las oportunidades disponibles y el 24 de junio de 1971 se lanzó la misión *Cosmos 428*. En esta ocasión se había instalado a bordo un espectrómetro para energías superiores a los 30 keV, basado en un con un colimador del campo de visión de $2^\circ \times 17^\circ$ y otro instrumento para el rango entre 2 y 30 keV. Aunque la misión duró poco tiempo, pudo identificar una serie de fuentes de rayos X que aparecen también en el catálogo del satélite *Uhuru*, ampliando la visión de estos objetos a un mayor rango de energías. Le seguiría el *Cosmos 461*, lanzado el 2 de diciembre de 1971. Operaba en el rango 28 keV-4,1 MeV y aparte de observar una de las explosiones cósmicas de rayos gamma detectada por *Vela*, pudo medir el espectro del fondo X con más detalle que sus antecesores en el rango de energías ya mencionado. A continuación vendrían el *Cosmos 561* (lanzado el 25 de marzo de 1973) y el *Cosmos 731* (lanzado el 21 de mayo de 1975).

Entretanto, un espectrómetro de rayos X había sido colocado (junto con otro de rayos gamma) en el *Apollo 16*. Dicho espectrómetro estaba constituido por tres contadores proporcionales colimados de forma que el campo de visión era de 60° . El mejor resultado -y prácticamente el único- fue la observación del espectro en rayos X y gamma desde 2 keV hasta 2 MeV de una de estas fuentes transitorias de rayos gamma.

Por otro lado, se siguió aprovechando la serie de satélites OSO y, el 29 de septiembre de 1971, fue lanzado el satélite *OSO-7*, una plataforma de 674 kg de peso con dos experimentos de rayos X a bordo para rastrear todo el cielo e identificar nuevas fuentes (ver figura 19). Uno de estos instrumentos era un sistema de contadores proporcionales sensibles en un rango amplio de energías, entre 1 y 60 keV, con una resolución angular de 1° y temporal de 3,2 minutos. El otro era un experimento con un contador de estrellas para energías entre 7 y 550 keV. A

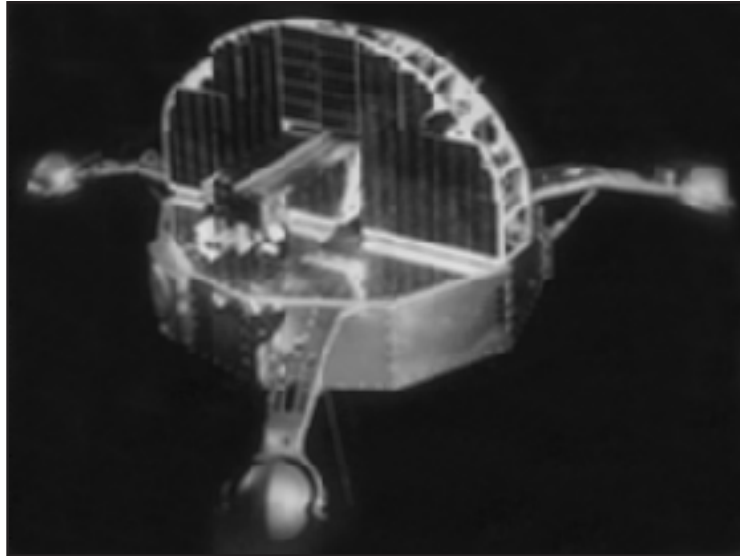


Fig.19: El satélite OSO-7. Comparar con el OSO-3 (figura 12).

pesar de una serie de problemas iniciales, estos instrumentos funcionaron hasta 1973 y permitieron la confección de un catálogo de 184 fuentes observadas en cuatro bandas de energía, mediante el barrido sistemático de grandes círculos en la esfera celeste, como complemento en altas energías de las observaciones de *Uhuru*. Además se realizaron importantes observaciones de Sco X-1, Her X-1 y Cyg X-1, así como del residuo de supernova IC 443, de la supernova SN1972e y de la fuente esporádica GX 354+3, cercana al centro galáctico. Probablemente lo más importante sería el descubrimiento de la periodicidad de 4,8 horas en el sistema Cygnus X-3, que a la postre sería confirmado como el periodo orbital del mismo.

La segunda misión europea fue *TD-1A*, lanzada al espacio el 12 de marzo de 1972 desde la base norteamericana de Vandenberg por un cohete *Thor-Delta*. El eje óptico se mantuvo perpendicular a la dirección solar, de modo que fue el primer satélite europeo estabilizado en tres ejes. Pudo observar la totalidad de la esfera celeste en seis meses. Aunque primordialmente se trataba de una misión ultravioleta, llevaba un detector de rayos X y otro de gamma. El primero era un contador proporcional sensible entre 3 y 30 keV, aunque fue desconectado prácticamente desde el inicio de las observaciones por diversos problemas técnicos.

Con el fin de estudiar el Universo en el rango ultravioleta, el 21 de agosto de 1972 la NASA lanzó el satélite *OAO-3*, que también es conocido con el nombre de *Copérnico*, al celebrarse en 1973 el quinto centenario del nacimiento del famoso astrónomo polaco. Este satélite (ver figura 20) era una plataforma estabilizada en tres ejes y, junto con los telescopios para observar en el rango ultravioleta, llevaba

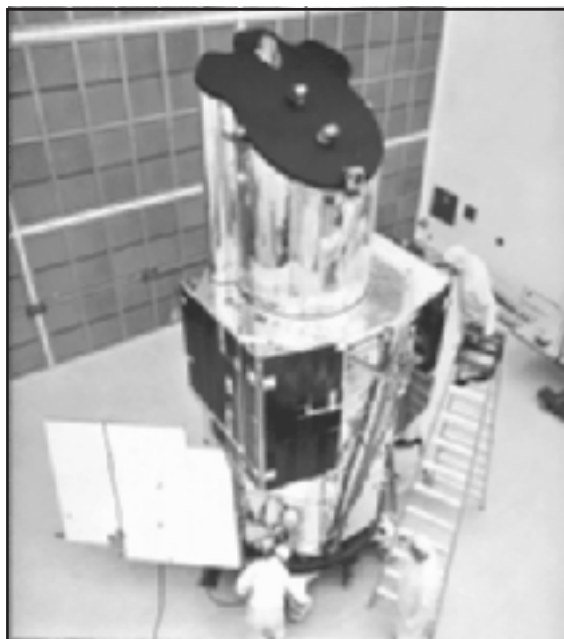


Fig. 20: El satélite OAO-3 (Copérnico).

dos conjuntos de contadores proporcionales de rayos X relativamente pequeños, ya que se había visto que la utilización de contadores pequeños reducía enormemente el ruido de fondo. Operaban en el rango 0,4-1,5 keV y 1,4-4,2 keV. Además contaba con un contador colimado para los rayos X más duros (2,5-10 keV).

Dado que *Copérnico* era un satélite con capacidad de apuntado, las posibilidades de hacer exposiciones largas de un mismo objeto crecieron enormemente con respecto a instrumentos anteriores que sólo hacían barridos del cielo. Por primera vez se obtuvieron imágenes de fuentes extensas de rayos X, mediante medidas en puntos diferentes alrededor de un objeto seleccionado, con una resolución del orden de $10'$. Esta técnica se aplicó a la observación del residuo de supernova conocido como Puppis-A y de un sector de la nebulosa del Velo en el Cisne (otro residuo). También se pudo detectar en sólo 24 horas un cambio brusco de luminosidad X (un factor cuatro) del núcleo de la galaxia activa Cen A respecto de medidas anteriores con el *OSO-7*. Ésta era la primera fuente variable de rayos X que se observaba fuera de nuestra galaxia. El satélite de astronomía ultravioleta *Copérnico* estuvo en funcionamiento hasta 1980, y los resultados en el rango X fueron tan interesantes que se aprobó la observación de fuentes de rayos X como objetivo primario en numerosas ocasiones, a pesar de ser una misión dedicada a la astronomía ultravioleta. La duración de la misión permitió, no sólo medidas contemporáneas con el satélite *Uhuru*, sino la conexión de éste con los primeros grandes observatorios de rayos X.

Desde el punto de vista de las nuevas tecnologías, seguramente lo más interesante fue la utilización en los contadores proporcionales de un colector de radia-

ción previo, mediante técnicas de incidencia rasante, en vez de los colimadores usuales. El colector de incidencia rasante representaba un avance importante para las observaciones de rayos X pues, hasta ahora, sólo habíamos visto detectores de diferentes tipos con sistemas de colimación para aumentar la resolución angular. Para concentrar la mayor cantidad posible de radiación sobre el detector, en astronomía óptica se utilizan telescopios colectores que concentran fotones sobre el plano focal. Pero, los fotones de alta energía que inciden perpendicularmente sobre una superficie no son reflejados sino que penetran en ella por lo que no parece posible la construcción de espejos de rayos X. Sin embargo, se demostró que se podían reflejar fotones X aprovechando una incidencia rasante. Al final de esta sección veremos cómo funcionan estos sistemas colectores, dentro de un apartado dedicado a los telescopios de rayos X.

La estación tripulada norteamericana *Skylab-3*, puesta en órbita el 14 de marzo de 1973, también fue aprovechada para realizar experimentos en rayos X. Por un lado, se había instalado en la etapa superior del cohete *Saturno*, que lanzó al espacio la estación espacial, el instrumento S-150 que se activó al separarse la última fase, el 28 de julio. El S-150 tenía tres contadores proporcionales sensibles a fotones X muy blandos, en el límite con el ultravioleta extremo en el rango entre 4 y 10 nm, y un sistema de colimadores definiendo regiones del cielo de $2^\circ \times 20^\circ$. Aunque no se pudieron identificar fuentes puntuales, se pudo medir la componente menos energética de la radiación difusa del fondo de rayos X, que posiblemente se genera en un gas caliente que rodea al Sistema Solar dentro del medio interestelar y no exclusivamente como efecto conjunto de multitud de fuentes X discretas. Por otro lado, a bordo de la estación espacial, se introdujeron dos telescopios de incidencia rasante para rayos X que permitían obtener imágenes del Sol sobre el plano focal con una resolución de $2''$. Esto representaba, al año del lanzamiento de *Copérnico*,

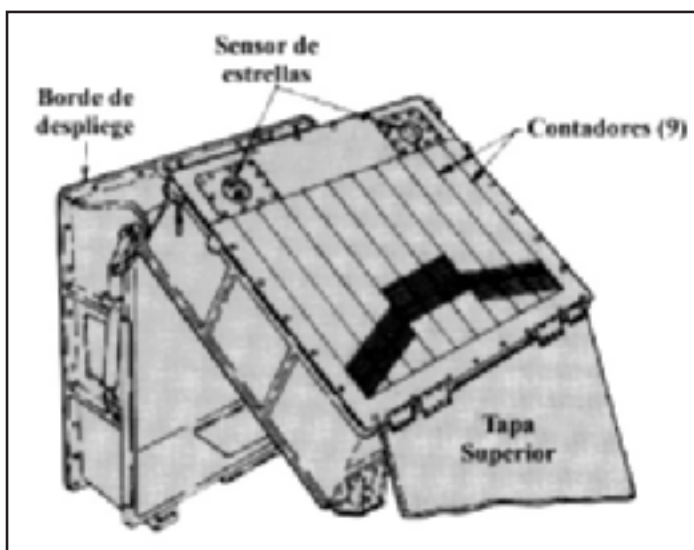


Fig. 21: El sistema de colimadores S-150 en el Skylab-3.

una mejora sustancial de la capacidad de formar imágenes X y no sólo recolectar un mayor número de fotones. Quedó así demostrado que la Astronomía X también podría incluir el análisis de imágenes bidimensionales para estudios astrofísicos. Las espectaculares fotografías del Sol en rayos X que se obtuvieron desde el *Skylab* eliminaron cualquier duda que pudiera existir todavía sobre este aspecto.

Finalmente, y aunque no sea en sí una misión propiamente dicha, decir que en 1973 y en uno de los vuelos que con cohete de sondeo se siguieron haciendo durante esta década, el grupo de científicos del Centro Espacial de Vuelo Goddard de la NASA (Pete Selermitsos, Elihu Boldt, Steve Holt y Rick Rothschild) junto con J. L. Saba, descubrieron la primera línea en un espectro X, la del hierro a 6,7 keV, que abriría paso al desarrollo de la espectroscopía X en futuras misiones. El resultado fue confirmado en un subsiguiente vuelo un año después.

2.4. Los satélites *ANS* y *Ariel-5*

A la terminación de la misión *Uhuru*, estaban ya preparadas una serie de actividades para profundizar en el conocimiento del sorprendente Universo X que se había descubierto. El satélite holandés *ANS* (*Astronomische Nederlandse Satelliet*), fue lanzado el 30 de agosto de 1974 desde la base norteamericana de Vandenberg, empleando un cohete *Scout*, con dos instrumentos de rayos X a bordo (el SXX y el HXX) y un experimento de astronomía ultravioleta. Un nuevo país se incorporaba a la exploración del cielo en rayos X que, además, fomentaría la entrada activa en este campo de la Agencia Espacial Europea. El satélite estaba estabilizado en tres ejes, pudiendo apuntar a una fuente seleccionada con una precisión de 20", y estuvo en funcionamiento hasta 1976 (ver figura 22). Lamentablemente, debido a un problema en el lanzamiento, el satélite fue colocado en una órbita poco ade-

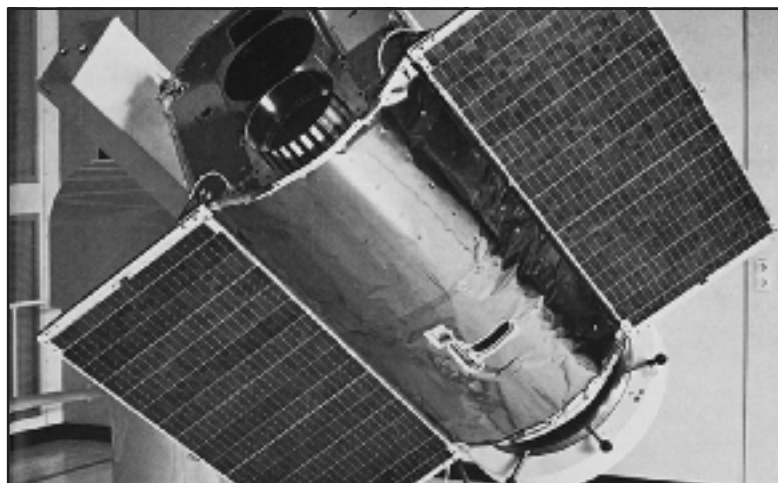
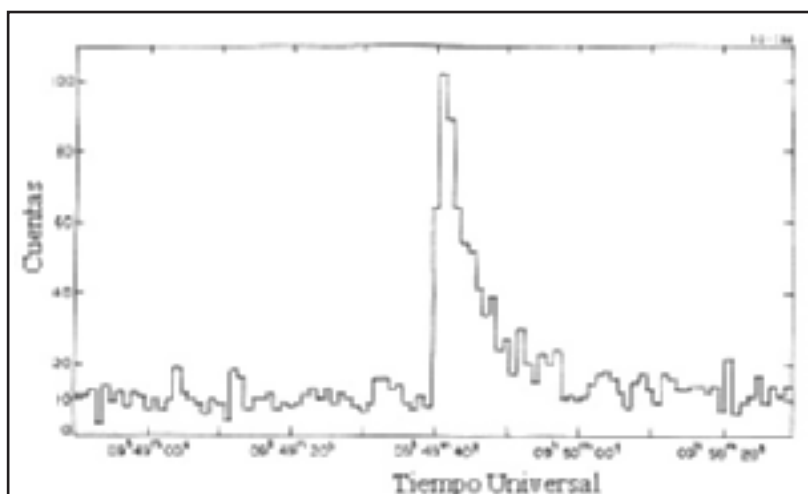


Fig. 22: El satélite holandés ANS.

cuada, baja y excéntrica, lo que exigió una reprogramación de las observaciones y limitó la duración de la misión. Los instrumentos de rayos X eran un sistema de conteo proporcional con un colector de incidencia rasante de baja energía (2 a 6 keV), y un sistema de conteo proporcional para energías más altas (1,5 a 30 keV) con un cristal de Bragg para la realización de medidas espectroscópicas. El éxito más notable de la misión fue, sin duda, el descubrimiento realizado en 1975 por Josh Grindlay and John Heise de las fuentes eruptivas de rayos X, estando localizada la primera de ellas en el cúmulo globular NGC 6624 (figura 23). Independientemente también habían sido descubiertas por Belian, Conner y Evans, usando datos de *Vela*. Estas fuentes proporcionarían valiosa información sobre las masas y estrellas de neutrones, como el holandés Jan van Paradijs demostraría a

Fig. 23: La primera erupción X descubierta en NGC 6624 por ANS.



finales de la década. Además de estos resultados, es de destacar el descubrimiento de ráfagas de emisión de rayos X en estrellas tipo «flare» (como UV Ceti y YZ CMi) y la emisión de rayos X coroneales, similares a los observados en la corona solar aunque con una intensidad mucho mayor, en Sirius, Capella y estrellas frías de los últimos tipos espectrales. *ANS* estuvo funcionando hasta 1976.

Sin embargo, el auténtico continuador de los trabajos llevados a cabo por *Uhuru*, fue el satélite británico *Ariel-5*. Estabilizado por rotación, tenía forma de tambor y la superficie exterior prácticamente cubierta por paneles solares (ver figura 24). Dos instrumentos observaban lateralmente, rastreando todo el cielo según la rotación del satélite, y otros cuatro estaban instalados en paralelo con el eje de giro. Este eje podía ser direccionado con cierta precisión hacia las fuentes que se quería observar con más detalle. Los dos instrumentos laterales eran un contador proporcional de gran tamaño, sensible al rango entre 1,5 y 20 keV, que escudriñaba una franja del cielo de 20° x 360°, y un monitor para todo el cielo, de gran campo, diseñado para detectar fenómenos transitorios con flujos superiores a 0,2 Crab en

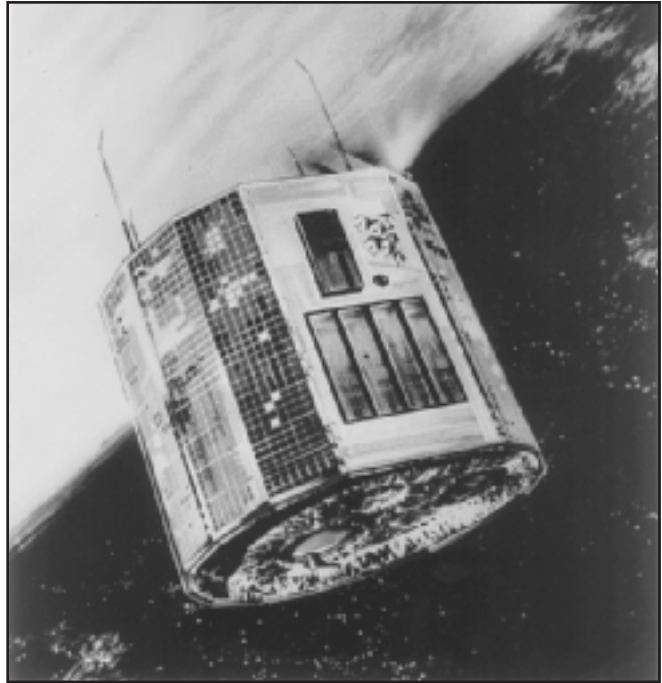


Fig. 24: EL satélite británico
Ariel-5.

el rango 3-6 keV. Entre los instrumentos colocados para observar sobre el eje de rotación, se contaba con un contador de tipo proporcional que incorporaba un sistema nuevo de colimación modulada. Este método de colimación, muy empleado posteriormente, mejoraba de forma significativa la precisión con la que se pueden localizar las fuentes de rayos X detectadas. El sistema de colimación modulada consiste en la colocación de una serie de redes paralelas en frente del detector de rayos X convencional. Si se rota el colimador o el instrumento observa a lo largo de un eje en rotación del satélite, la detección de rayos X va variando de acuerdo con el ángulo formado entre la posición de la fuente y el colimador. Durante el análisis de los datos se observa esta modulación y se puede calcular la posición de las fuentes con una precisión que, en el caso de *Ariel-5*, alcanzó 2'.

Otro contador proporcional que observaba a lo largo del eje de rotación del satélite, disponía de un espectrómetro tipo Bragg para la búsqueda de líneas espectrales en las fuentes de rayos X en la región 2-8 keV. Los espectrómetros Bragg, llamados así por W. H. Bragg, quien los desarrolló en la década de los 20, y a los que ya nos hemos referido en varias ocasiones como en el caso de uno de los instrumentos a bordo del satélite holandés *ANS*.

CUADRO III EL ESPECTRÓMETRO DE BRAGG

Un espectrómetro de Bragg se basa en introducir en el eje óptico una estructura cristalina cuyos átomos estén separados por una distancia d , para reflejar los fotones que llegan con un ángulo de incidencia muy pequeño. La reflexión tiene lugar sólo si el ángulo de incidencia (o ángulo de Bragg, σ_B) y la longitud de onda del fotón, λ , cumplen la relación,

$$2d \sin(\sigma_B) = n\lambda$$

donde n es un número entero.

Esta técnica, que es capaz de conseguir una gran resolución espectral, es lamentablemente muy poco eficaz desde el punto de vista de la energía incidente necesaria y sólo puede emplearse para estudiar las fuentes más brillantes. En la figura 25 mostramos un esquema básico del método de funcionamiento de un espectrómetro basado en la difracción de Bragg. El instrumento a bordo del *Ariel-5* era sensible a fotones en el rango entre 2 y 9 keV. Otro equipo de los instalados sobre el eje de rotación en el satélite *Ariel-5* era un contador de centelleo para la medida de la radiación de alta energía, por arriba de los 30 keV, con un colimador para localizar las fuentes con una precisión del orden de 2° . Por último, la misión llevaba un detector de conteo proporcional multihilo para medir los espectros de rayos X de fuentes puntuales en el rango entre 2 y 30 keV.

El satélite fue lanzado el 15 de octubre de 1974 desde la plataforma ecuatorial de San Marco, en Kenia, y estuvo en funcionamiento hasta 1980. Las contribuciones más interesantes de *Ariel-5* a la Astronomía X fueron el descubrimiento de púlsares de rayos X de largo periodo, del orden de minutos (como A 1118-61), y

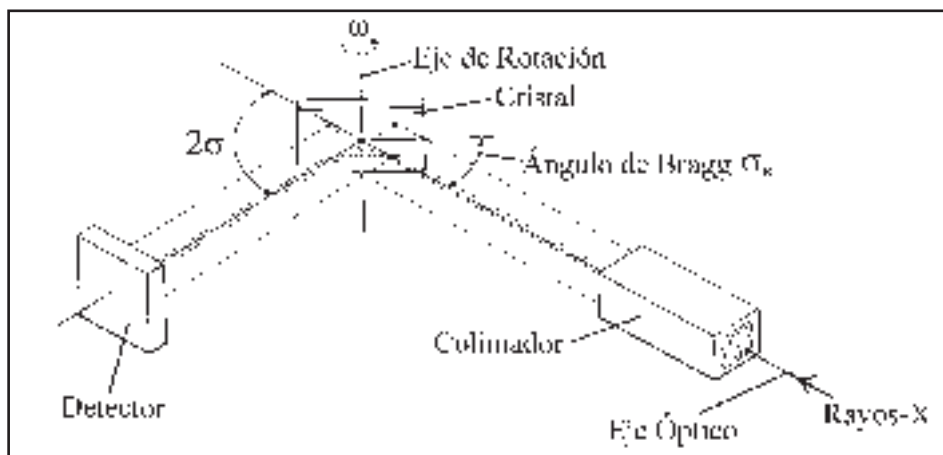


Fig. 25: Esquema de funcionamiento de un espectrómetro por difracción de Bragg.

el descubrimiento de algunas fuentes transitorias muy brillantes (Novas de rayos X). Fue el caso de A 0620-00 en agosto de 1975, anunciada por Martin Elvis y colaboradores justo antes de la conferencia de Leicester. ¡Qué buen regalo para los ingleses, como dijo Walter Lewin! Durante algunos meses eclipsó totalmente el brillo de Sco X-1 (ver figura 26). La contrapartida óptica fue identificada inmediatamente: había aumentado más de cien veces su brillo con respecto al estado anterior a la explosión X. En 1984, los norteamericanos Nick White y Frank Marshall sugirieron que el sistema podría contener un agujero negro, a tenor de su espectro X ultrasuave. Ello fue sustentado en 1986, diez años después del descubrimiento, por sus compatriotas Jeff McClintock y Ron Remillard en virtud a observaciones ópticas. Entre otros resultados de importancia, es de reseñar la presencia de una línea espectral, correspondiente a una energía de 6,7 keV, en varios restos de supernova. Esta línea espectral, como comentaremos en el capítulo IV resultó ser fundamental para realizar diagnósticos acerca de las condiciones físicas del plasma emisor de rayos X. También permitió establecer a las galaxias activas de tipo Seyfert 1 como emisores universales de rayos X. El catálogo de fuentes observadas por *Ariel-5* contenía alrededor de 250 objetos.

2.5. El final de la época de las misiones pequeñas: *SAS-3* y *OSO-8*

Los astrónomos soviéticos siguieron con sus programas paralelos para hacer estudios en Astronomía de rayos X, e incluyeron el experimento FILIN a bordo de la estación espacial soviética *Salyut-4* que se lanzó el 26 de diciembre de 1974 (figura 27). Este instrumento incluía un pequeño contador proporcional para rayos

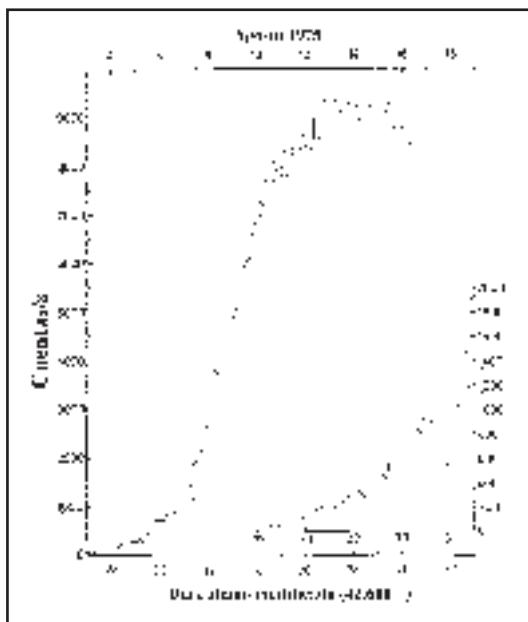


Fig. 26: La curva de luz en rayos X según las observaciones de Ariel-5. De M. Elvis y colaboradores, *Nature*, 257, Mc Millan, Londres, p. 656 (1975).

X blandos de 0,25 keV con un sistema colector de radiación de tipo paraboloide de 20 cm de diámetro. Además, se incorporaban dos contadores mayores, sensibles al rango entre 2 y 20 keV y uno pequeño para el rango entre 0,2 y 2 keV, con un campo de $3^\circ \times 10^\circ$ limitado por el colimador. Se realizaron barridos del cielo durante un mes, seguidos de observaciones puntuales de algunas fuentes durante dos meses aproximadamente. Entre estas medidas se incluyeron los objetos más brillantes y conocidos (Sco X-1, Cyg X-1, A 0620-00 y Circinus X-1). Por otro lado, la misión conjunta entre norteamericanos y soviéticos, conocida con el nombre de *Apollo-Soyuz* y realizada en 1975, incorporó un sistema de contadores proporcionales de rayos X capaz de medir en los rangos de energía entre 0,18 y 0,28 keV y entre 0,6 y 10 keV con una colimación circular de $4,5^\circ$. Con este equipo, se pudo medir la emisión de rayos X blandos de algunos restos de supernova y la pulsación X ultrarrápida de una fuente en la Nube Pequeña de Magallanes (SMC X-1), con una periodicidad de 0,716 s. Al igual que había ocurrido anteriormente con la estación espacial *Skylab*, las nuevas posibilidades ofrecidas por las misiones tripuladas para instalar en órbita equipos más pesados para analizar la radiación X y probar nuevas tecnologías, a pesar de la menor duración de los experimentos, hacían prever la necesidad de superar la época de las misiones pequeñas, tipo *Uhuru*, que tan buenos resultados habían proporcionado a la Astronomía de altas energías hasta entonces.

El 19 de abril de 1975 se lanzó *Aryabhata*, el primer satélite de la India, que portaba varios experimentos de rayos X. Por desgracia, un fallo en el suministro de potencia eléctrica acabó con la vida operacional de los instrumentos. Su sucesor ya no sería lanzado hasta veinte años después.

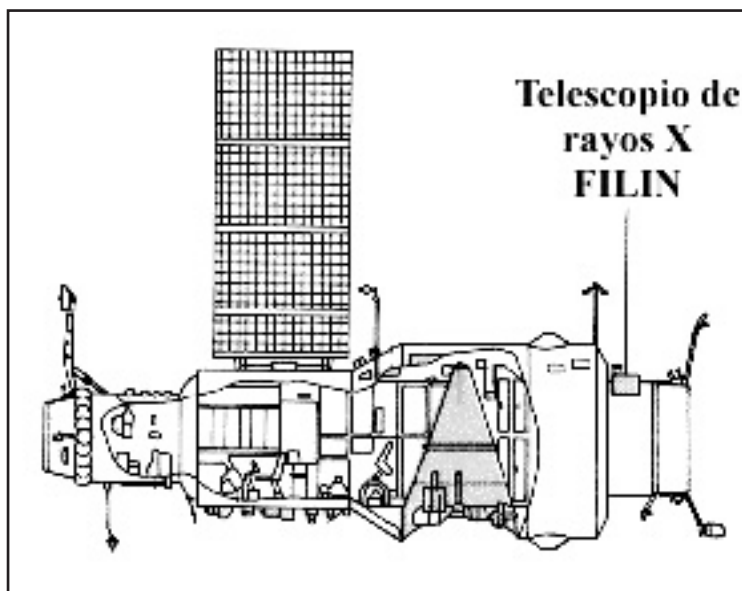


Fig. 27: Ubicación del experimento FILIN en la estación espacial Salyut-4.

Pero todavía se lanzarían dos misiones más, relativamente pequeñas, con un importante impacto sobre la Astronomía X. La misión norteamericana *SAS-3*, continuadora de la serie de satélites comenzada por la misión *Uhuru*, se lanzó igual que su predecesor desde la base ecuatorial de San Marco el 7 de mayo de 1975 con un cohete *Scout*. Catalogado dentro de la serie *Explorer* de NASA con el número 53, estuvo en funcionamiento hasta 1979 y, como *Uhuru*, *SAS-3* era un satélite estabilizado por rotación con velocidad angular controlada mediante un giróscopo con un conjunto de experimentos de rayos X a bordo (figura 28). Esta vez, sin embargo, la velocidad de rotación era de solamente $0,1^\circ$ por segundo. Por ello, los instrumentos podían apuntarse, aunque con cierta deriva, y era viable la

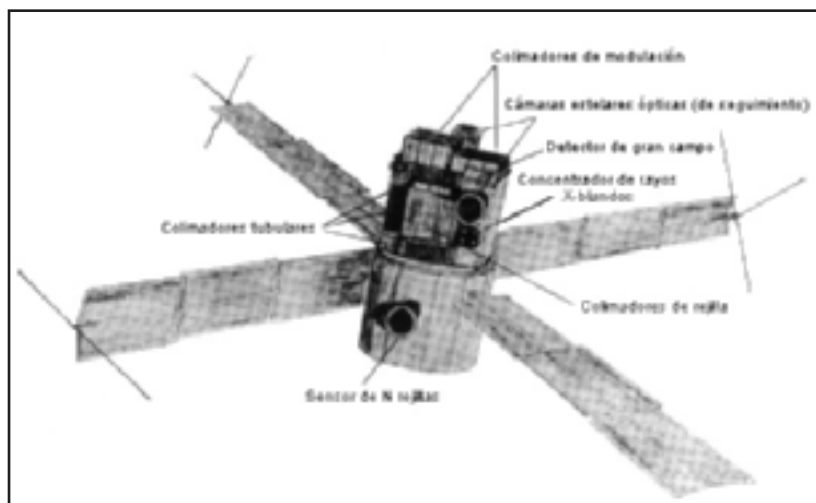


Fig. 28:
La misión
SAS-3.

observación casi continuada de una misma fuente durante unos 30 minutos. *SAS-3* llevaba a bordo instrumentación X variada. Por una parte, una red de contadores proporcionales con tres colimadores tubulares y otros tres de rejilla. Por medio de estos últimos, y conforme se iba barriendo el cielo, una fuente X iba apareciendo en cada uno de los detectores, de modo que la intersección de los distintos campos ($2^\circ \times 120^\circ$, $1^\circ \times 100^\circ$ y $0,5^\circ \times 32^\circ$) permitía la localización de las fuentes con sólo $15''$ de incertidumbre. *SAS-3* además contaba con un pequeño sistema de cuatro colectores con contadores proporcionales de ventana delgada sensibles en el rango 0,5-1 keV y sistemas de colimación modulada para medir posiciones de fuentes con precisiones del orden $2', 3'$ y $4', 5'$ respectivamente. La misión fue muy activa en la búsqueda de fuentes eruptivas de rayos X, descubriendo una docena de ellas muchas asociadas con cúmulos globulares. Sus resultados científicos incluyen, además del descubrimiento de una fuente con erupciones muy rápidas (el *Rapid Burster*, capítulo IV), el primer sistema binario con una estrella enana blanca fuertemente magnetizada (AM Her), la emisión X de la primera enana blanca aislada (HZ 43), la obtención de mapas Doppler de órbitas de binarias de rayos

X y determinaciones de aceleraciones en púlsares de rayos X, que contribuyeron significativamente a la comprensión de las masas de las estrellas de neutrones y los torques de acrecimiento en estas estrellas. Además se hizo un rastreo de la emisión de rayos X blandos de todo el cielo y se localizaron con precisión unas 60 fuentes que llevaron al descubrimiento de la emisión X de la binaria Algol, de las estrellas binarias de tipo Be y de 3C 273, el primer cuásar descubierto en virtud a su emisión X.

A las pocas semanas, el 21 de junio de 1975 se puso en órbita otro satélite de la serie *OSO* para la observación del Sol. Esta vez, la misión *OSO-8*, cuyo esquema presentamos en la figura 29, llevaba a bordo una serie de instrumentos de rayos X, tanto para el barrido completo del cielo igual que en misiones anteriores, como para la realización de observaciones no solares con apuntamiento. Esto era posible empleando la sección rotante de la plataforma con un sistema de control de actitud para apuntar a fuentes individuales dentro del campo de visión, según la época del año. Un sistema de contadores proporcionales con un ruido extremadamente bajo, sensibles a un rango amplio de energías (2-60 keV) y con buena resolución energética permitió la detección de la línea de emisión del hierro, similar a la ya observada en algunos restos de supernova por *Ariel-5*, pero esta vez en varios cúmulos de galaxias. Ello demostraba que esta emisión de origen térmico provenía de un gas caliente inherente al propio cúmulo. Igualmente se vio que el espectro de las erupciones X era del tipo cuerpo negro, lo cual permitió el entendimiento de la física de estos objetos en términos de reacciones nucleares desbocadas. La misión también llevaba un experimento de rayos X blandos para el estudio de la radiación difusa de fondo en energías de 0,15 a 45 keV, con una resolución espacial de unos 3°, un contador de centelleo para rayos X duros (10 keV-1 MeV), un espectrómetro tipo Bragg y un polarímetro

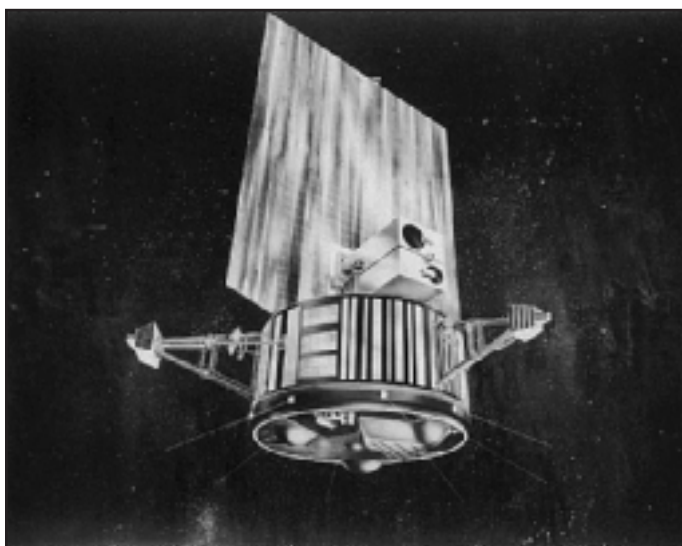


Fig. 29: El satélite norteamericano *OSO-8*. La parte inferior (la «rueda») estaba en rotación, mientras que la superior (la «vela») se mantenía fija de cara al Sol.

de rayos X. El contador de centelleo detectó una fuente de rayos X energéticos en las proximidades del centro galáctico mientras que el polarímetro estableció el primer límite superior del grado de polarización en varios sistemas binarios de rayos X y proporcionó medidas precisas de la polarización lineal de rayos X de la nebulosa del Cangrejo, demostrando el origen sincrotrón de esta radiación a diferencia de otros restos de explosiones supernova. Permaneció en funcionamiento hasta septiembre de 1978.

Al terminar la época de los pequeños satélites, se había establecido la existencia de más de 500 fuentes de rayos X en el cielo. Las emisiones galácticas procedían principalmente de sistemas binarios con fenómenos de acrecimiento de materia sobre componentes degeneradas o bien por parte de restos de explosiones supernova, mientras que las fuentes extragalácticas eran básicamente núcleos activos de galaxias y cúmulos de galaxias. Por otro lado, había quedado claramente comprobada la existencia de un fondo difuso de radiación X y los experimentos, realizados paralelamente, a bordo de cohetes de sondeo o, en los últimos años, en estaciones espaciales, habían permitido desarrollar y probar nuevos tipos de instrumentos cada vez más sofisticados: más eficaces, sensibles a un mayor rango de energías, con capacidad para espectroscopía de alta resolución y polarimetría, con espejos colectores y sistemas de focalización para obtener imágenes bidimensionales.

2.6. Los primeros grandes instrumentos en órbita

En 1976, la astrofísica de altas energías y, en particular la de rayos X, había adquirido la madurez suficiente como para dar un nuevo salto hacia adelante y comenzar una tercera época en la historia de la Astronomía X. Nuevamente, sería la Agencia Espacial Norteamericana, NASA, la responsable de abrir el camino ya que a principios de 1977 tenía preparada una serie de satélites con grandes instrumentos a bordo, bajo la denominación de *HEAO* (*High Energy Astronomical Observatory*), con instrumentación muy mejorada y técnicas de apuntamiento precisas así como sistemas complejos para la focalización y construcción de imágenes en rayos X. La carga útil de estos observatorios no estaba limitada por el espacio disponible a bordo de un pequeño satélite capaz de ser puesto en órbita por un lanzador modesto como el *Scout*, y podía alcanzar un tamaño de unos 3 x 6 metros y un peso de unos 2.700 kg. Para reducir costos, cada satélite estaba basado en unos módulos de servicio con subsistemas muy similares entre sí que permitían el aprovechamiento de diseños y desarrollos, algo que hoy día es ampliamente utilizado por todas las agencias espaciales. Naturalmente, el complejo instrumental a bordo de estas misiones exigía además que el módulo de servicio incorporase sistemas de telemetría mucho más eficaces que en satélites anteriores, para poder transmitir a tierra toda la información que se almacenaba, y los cohetes lanzadores tenían que ser mucho mayores que el *Scout* lo que dificultaba su utilización desde bases como Malindi en Kenia.

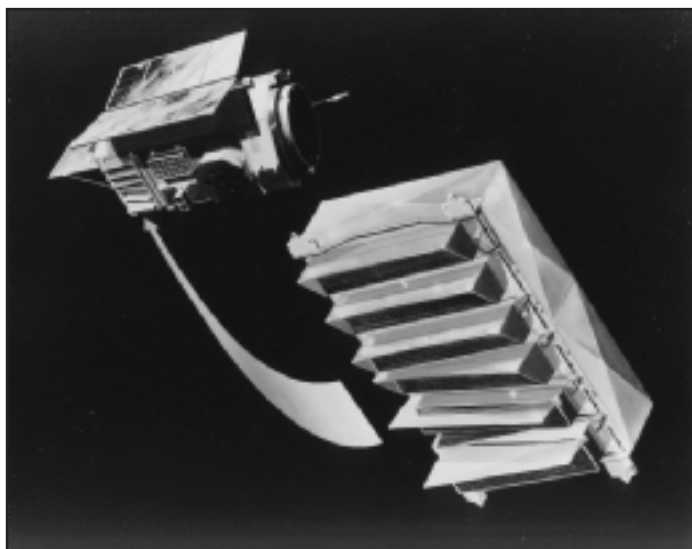
El satélite *HEAO 1* fue lanzado desde la base de Cabo Kennedy, en Florida, con un cohete *Atlas-Centauro* el 12 de agosto de 1977. El nuevo observatorio (ver figura 30) llevaba a bordo cuatro instrumentos principales. El primero era un sistema modular de siete contadores proporcionales (LASS) sensibles al rango de energía entre 0,25 y 25 keV, diseñado para rastrear todo el cielo en busca de fuentes puntuales tan débiles como 0,25 mCrab, con una gran área efectiva ($3 \times 1.350 \text{ cm}^2$ y $4 \times 1.600 \text{ cm}^2$) y una imponente resolución temporal siendo capaz de medir variaciones de la emisión X de hasta 5 microsegundos. El segundo consistía en un sistema de seis contadores proporcionales más pequeños (CXE) diseñados para el estudio de la radiación difusa de fondo en rayos X dentro de un rango conjunto 0,15-60 keV, pues dos (con propano) operaban en 0,15-3 keV, uno con argón entre 1,5 y 20 keV y los tres restantes (con xenón) en el rango 2,5-60 keV (figura 31). El tercer instrumento (MC) era un conjunto de detectores colimados por modulación para la determinación precisa ($< 2'$) de la posición de fuentes individuales de rayos X en el cielo, de modo que su pudieran identificar bien en el óptico o en radio. El cuarto y último experimento (A4), consistía en un sistema de contadores de centelleo para la medida de radiación de alta energía en el rango entre 15 y 200 keV.

Los detectores a bordo de la misión *HEAO 1* eran mucho más sensibles que los empleados en el pequeño satélite *Uhuru* pero, al igual que éste, el nuevo observatorio era básicamente una misión de rastreo del cielo y búsqueda de fuentes de rayos X, ya que giraba una vuelta cada 30 minutos alrededor del eje



Fig. 30: El satélite norteamericano HEAO-1.

Fig. 31:Detalle del experimento A2 (= CXE) en HEAO-1.



Tierra-Sol. De esta forma, los instrumentos barrían círculos de la esfera celeste perpendiculares al Sol que se desplazaban del orden de un grado por día. Como los instrumentos tenían un campo de visión entre 1° y 4° , excepto el detector de alta energía, una fuente cualquiera cercana a la eclíptica era observada durante varios días mientras que las próximas a los polos eran barridas de forma casi continua durante toda la duración de la misión. Así se completó un nuevo rastreo completo del cielo durante seis meses y el proceso se repitió casi tres veces antes de terminar las operaciones. La capacidad de apuntado era algo limitada pero se utilizó en algunas ocasiones, especialmente al final de la misión en enero de 1979, para obtener un seguimiento continuo de fuentes seleccionadas como particularmente interesantes.

El experimento LASS proporcionó hasta un nivel de detección de 1 mCrab, un catálogo de 842 fuentes de rayos X que mostramos en la figura 32, mejorando claramente el anterior catálogo obtenido con la misión *Uhuru* (figura 17). Tanto las observaciones puntuales como las medidas realizadas durante el rastreo de todo el cielo pusieron de manifiesto la existencia de una rápida variabilidad en las fuentes de rayos X. En concreto se detectaron cambios de naturaleza no periódica, con escalas de tiempo del orden de 3 milisegundos, en la fuente Cyg X-1. Igualmente, los estudios de Lynn Cominsky y Kent Wood, permitieron por vez primera obtener un periodo orbital en una binaria X, al detectar un eclipse cada 7,1 horas en el flujo X. El experimento CXE proporcionó el descubrimiento de 85 fuentes fuera del ecuador galáctico, núcleos activos de galaxias y cúmulos de galaxias. Igualmente confirmó que las estrellas binarias del tipo RS CVn son importantes emisores de rayos X de origen coronal, y las pulsaciones en las variables cataclísmicas SS Cyg y U Gem, así como el establecimiento de la función de distribución de la energía

CUADRO IV. LA CONDICION DEL SENO DE ABBE.

Para que cualquier sistema óptico sea capaz de formar una imagen, debe de satisfacer, aunque sea de manera aproximada, la llamada «condición de ABbe (por el óptico alemán Ernst Abbe)», que implica que un sistema óptico formará una imagen de un objeto (en el infinito) sólo si para cada rayo de luz procedente de la fuente se cumple que

$$f = \frac{h}{\sin(\theta)}$$

donde h es la distancia (radial) del rayo al eje óptico, θ es el ángulo entre su recorrido final e incidente, y f es un valor constante para todos los rayos (Fig. 33). Así, se forma una imagen si la superficie principal, definida como la región en la que intersectan los recorridos iniciales y finales de los rayos, es esférica. Por ello, cualquier sistema que verifique la condición del seno de Abbe, actúa como una simple lente esférica.

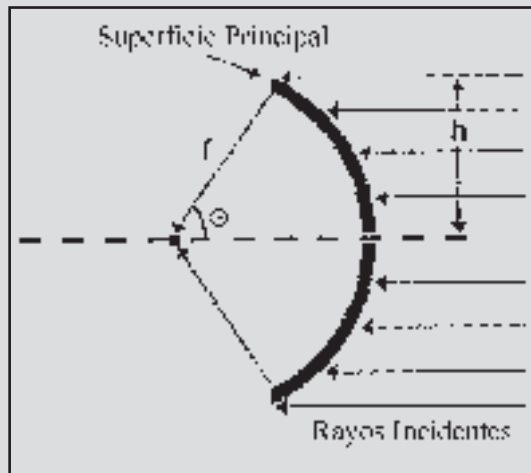


Fig.33: Representación de un sistema verificando la condición del seno de Abbe.

El primer sistema para enfocar de rayos X que presentaron Giacconi y Rossi en 1960, era un simple espejo parabólico, a semejanza de los que se usan como espejo primario en los telescopios ópticos reflectores. Rayos paraxiales (paralelos al eje óptico) convergen en un punto sin ningún problema, pero los procedentes de objetos fuera del eje, no se pueden enfocar bien y producen una imagen borrosa. Para ellos los reflectores ópticos utilizan una lente correctora, con lo cual prácticamente satisfacen la condición de Abbe. Esta lente obviamente, no podía ser utilizada en el diseño de la instrumentación que propugnaban ambos científicos.

2.7. Telescopios de rayos X

Ya se sabía que cuando los rayos X se encuentran frontalmente con una superficie no son reflejados, con independencia del material del que esté hecha. Los fotones atraviesan el material o son absorbidos por él incrustándose como las balas en un trozo de madera. Por el contrario, si los rayos X inciden sobre la superficie de forma rasante, es decir, con un ángulo casi tangencial, rebotan con un alto grado de eficacia, de forma similar a como lo hacen las piedras lanzadas para hacer el «salto de la rana» sobre la superficie del agua. Este tipo de incidencia rasante es la clave para dirigir los fotones de rayos X hacia un punto focal de convergencia.

La posibilidad de construir un verdadero telescopio de rayos X, capaz de enfocar esta radiación sobre un punto y formar imágenes, no sólo coleccionar una mayor cantidad como habían hecho los sistemas parabólicos utilizados hasta entonces, era la ilusión del grupo de investigadores liderado por Riccardo Giacconi en Estados Unidos, que tantos esfuerzos había dedicado a la Astronomía X. No obstante ya eran conocidos por el grupo los trabajos que desde 1948, Albert Baez (nacido en Méjico y padre de la famosa cantante) y Paul Kirkpatrick habían realizado en este campo. La historia se remonta a finales de la década de los 40, cuando dos grupos de investigadores estaban estudiando unas técnicas que llegarían a que la microscopía de rayos X confluyera en la holografía. A la par que Dennis Gabor en el Reino Unido (futuro Nobel) trataba de mejorar la resolución del microscopio electrónico a través de la holografía, el estadounidense Paul Kirkpatrick desarrollaba el primer microscopio por reflexión de rayos X en la Universidad de Stanford. Según palabras del propio Baez, «los rayos X ya habían podido ser reflejados al incidir de manera rasante sobre espejos planos, pero los libros decían que era imposible enfocar los rayos X». Kirkpatrick demostró que estaban equivocados. Realizó una demostración en un coloquio de Física en Stanford, pero utilizando luz visible y lentes cilíndricas en vez de rayos X y espejos. El objeto iluminado, y del cual había que obtener la imagen no era otro que un trozo rectangular de tela metálica. Cuando utilizó la primera lente, la imagen resultante era un conjunto de líneas paralelas. Kirkpatrick «predijo» que al introducir la segunda lente cilíndrica de manera ortogonal a la primera, el sistema se comportaría como una lente esférica, verificando por tanto la condición del seno de Abbe. Hubo entonces desconcierto y desconfianza entre el público, entre ellos un futuro ganador del Nobel. Cuando Kirkpatrick intersectó el haz con la segunda lente cilíndrica (figura 34), la imagen de la malla metálica rectangular apareció perfectamente en la pantalla de proyección y el público rompió en aplausos. El propio Baez, ya como postgraduado en Stanford contaba: «Fue un privilegio compartir la excitación de aquellos experimentos iniciales para lograr enfocar los rayos X. Una vez que mis ojos se adaptaron a la oscuridad, observé en una pantalla fluorescente, cómo el haz de rayos X reflejado por un espejo simple se estrechaba hasta formar una línea conforme yo manipulaba

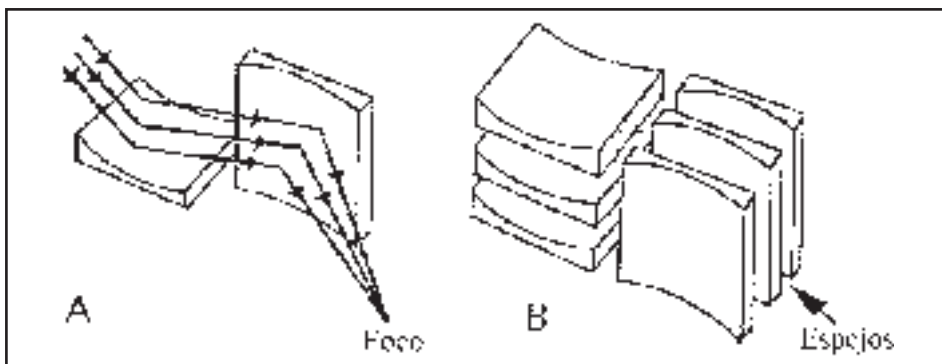


Figura 34. Diseño del telescopio de rayos X de Kirkpatrick-Baez. El sistema consta de un conjunto de espejos (B) con superficies parabólicas ortogonales que reflejan los rayos dos veces (A) haciendo posible el enfoque de los mismos.

un dispositivo que permitía ir curvando el espejo. ¡Eureka! ¡Habíamos enfocado los rayos X! En aquellos días todavía era posible realizar algún experimento útil, como decía Rutherford: ... con amor, cuerda y lacre».

En mayo de 1960 y al abrigo del *Smithsonian Astrophysical Laboratory*, se celebró un congreso sobre Astronomía X (de un día de duración), que sería pionero de todos los demás que habrían de celebrarse en el futuro. Tres años después el americano John Lindsag conseguía la primera imagen obtenida por un telescopio de rayos X: el Sol.

También en los años cincuenta, el físico alemán Hans Wolter, había estudiado en detalle la física de la reflexión de los rayos X por incidencia rasante, y las posibles configuraciones de espejos que se podían utilizar con el fin de construir microscopios de rayos X. La eficiencia de la reflexión depende del ángulo de incidencia de la radiación y de las propiedades de la superficie reflectora. Aunque los metales con número atómico bajo son buenos reflectores con ángulos de incidencia menores que 1° , su reflectividad decrece bruscamente para ángulos ligeramente superiores. Sin embargo, los metales con número atómico alto, aún siendo algo menos eficaces para incidencias muy rasantes, mantienen propiedades similares hasta valores del orden de $2,5^\circ$.

En los primeros experimentos, como en la misión *Copérnico* ya comentada anteriormente, se probó con superficies definidas únicamente mediante paraboloides y se comprobó que, aún aumentando sensiblemente la capacidad colectora de fotones X frente a los detectores colimados, no era posible obtener imágenes al no quedar claramente definido un plano focal. Era necesario introducir dos reflexiones rasantes consecutivas, y el esquema adoptado para la construcción de telescopios de rayos X fue la de unir una sección de espejos paraboloides con otra de hiperboloides, de acuerdo con el diseño previsto por Wolter como tipo 1. En la figura 35 mostramos el funcionamiento de esta configuración para la obser-

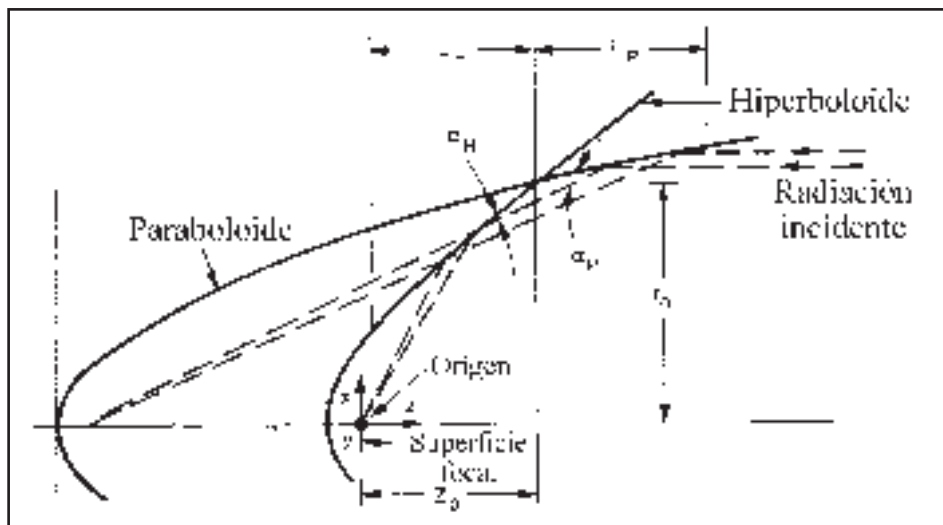


Fig. 35: Esquema de funcionamiento de un sistema de espejos de rayos X compuesto por un sector parabolóide y otro hiperboloide (tipo Wolter 1). Se indica el recorrido de los rayos X en el caso de incidencia únicamente en la superficie parabolóide y en ambas. El tipo Wolter 2 (no representado aquí) es más complicado, por lo que se emplea cuando se prefieren tomar imágenes en un campo más reducido.

vación de rayos X así como la convergencia de los rayos para el caso de una sola incidencia rasante en la superficie parabolóide. La reflexión doble es, de hecho, la que permite producir imágenes no distorsionadas de alta resolución.

Los telescopios de rayos X no se parecen en nada a los empleados en astronomía óptica. En apariencia son como grandes cilindros concéntricos con una especie de tapadera en la entrada (ver figura 36). Los rayos X penetran en el telescopio por el eje óptico y, tras chocar tangencialmente con las superficies interiores de los cilindros, son reflejados ligeramente hacia un punto central. El plano focal se encuentra fuera del conjunto de cilindros concéntricos, a veces muy alejado, por lo que es necesario colocar en órbita estructuras relativamente grandes, que mantengan rígidamente la posición de los espejos en un extremo y los instrumentos detectores en el otro. La presencia de una tapadera central es aconsejable para bloquear el paso directo de fotones X al plano focal y, la capacidad colectora del telescopio se reduce, por tanto, al área del anillo circular definido por las paredes de los cilindros. Como el área interior no es útil, es recomendable la colocación de la mayor cantidad posible de espejos concéntricos sobre el mismo eje, y aprovechar así al máximo la estructura del telescopio. El tamaño del espejo más interno está limitado solamente por la capacidad técnica para su construcción, manteniendo la calidad de definición necesaria en la superficie reflectora. Mientras más interna sea la superficie reflectora, la incidencia de los fotones que convergen en el plano focal será más rasante y por tanto, el telescopio podrá formar imágenes en un rango de energías más amplio.

CUADRO V. FÍSICA DE LA OBTENCIÓN DE IMAGENES EN RAYOS X.

El diseño de un sistema colector de imágenes en rayos X es complicado a causa del gran número de limitaciones que conlleva la interacción de rayos X con la materia. En primer lugar, como es consabido, la incidencia normal de rayos X sobre cualquier material, hace que los primeros sean mayormente absorbidos en vez de ser reflejados. Ello es lo que los hace tan ventajosos en la medicina hoy en día. Los rayos X atraviesan fácilmente la piel y los músculos, pero son absorbidos por los huesos, viéndose en un radiografía lo que es la «sombra» de los huesos. Es obvio que los espejos normales, como los usados en los telescopios ópticos no pueden ser utilizados por esta misma razón. En segundo lugar, el índice de refracción n es alrededor de 1 para todos los materiales en las longitudes de onda de los rayos X, por lo que cualquier sistema de refracción, como lentes, debería tener una distancia focal lo suficientemente larga para enfocar la radiación X, lo que a todas luces resulta imposible de utilizar en un satélite, siempre limitado por el espacio disponible.

En la mayoría de los materiales, el índice de refracción para los fotones X, es ligeramente inferior a la unidad, de modo que se puede hacer uso de la «reflexión total externa» cuando los rayos X inciden en una superficie con un ángulo rasante. El índice de refracción n , en las longitudes de onda de los rayos X, se puede escribir como:

$$n = 1 - d - ib$$

donde d y b dependen de la naturaleza del material y de la longitud de onda de los fotones X incidentes. Si $d > 0$ y $b \sim 0$, y los fotones X se propagan en el vacío ($n_1=1$), por la ley de la refracción (o ley de Snell por su descubridor, el holandés Willebrond Snell), $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$. Como $n_2 = 1 - d$, los rayos X sufrirán una reflexión total externa ($\theta_2 = 90^\circ$) para ángulos $\theta_1 > \theta_c$ (el ángulo crítico) donde

$$\sin(\theta_c) = 1 - d.$$

Así para ángulos mayores o iguales que $\theta_c \sim (2d)^{1/2}$, toda la energía incidente se refleja de regreso al medio incidente. Un fenómeno análogo que ocurre en el visible, es la reflexión total interna, que se da por ejemplo, en el resplandor de un diamante, pues el índice de refracción del diamante es mayor que el del aire, de modo que en el interior del diamante, la luz se refleja en las varias caras.

Por lo general, la dependencia de d y de θ_c en un material es proporcional al número atómico, Z . Por ello, materiales con Z alto reflejan los rayos X con mejor eficiencia que los de Z bajo, siendo por ello los materiales más usados el níquel ($Z=28$) y el oro ($Z=79$), para los cuales $\theta_c \sim 1^\circ$.

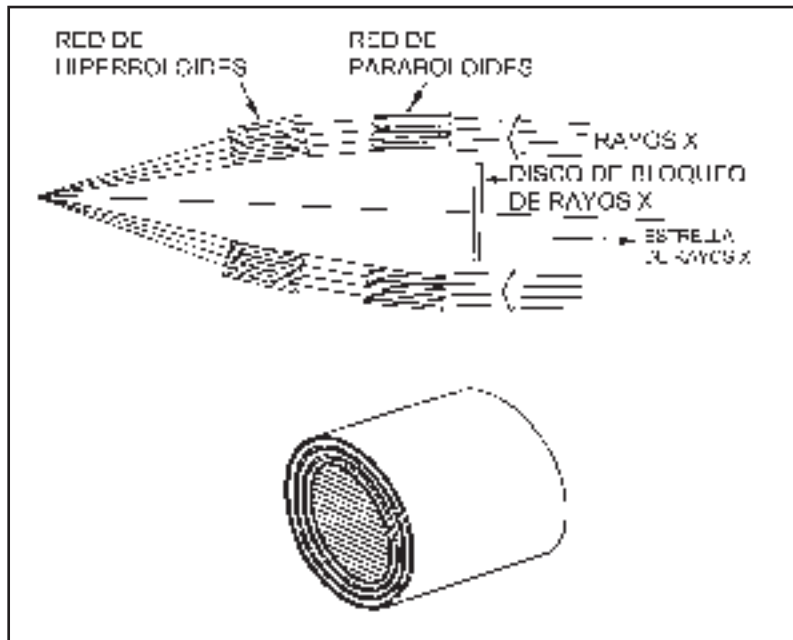


Fig. 36: Telescopio de rayos X formado por cuatro espejos anidados como el del Observatorio Einstein.

La tecnología para la fabricación de grandes telescopios de rayos X no existía en la época de Wolter y se encontraba en los límites de lo posible cuando se lo planteó Giacconi y compañía. Los espejos eran producidos con vidrio de gran calidad al que se le daba la forma necesaria, hiperboloide o paraboloide, para ser posteriormente pulido en su parte interior obteniendo una definición de la superficie con un error menor que 10 \AA . Sobre esta superficie se depositaba una capa reflectora de cromo o níquel, y los espejos eran luego alineados y montados en una estructura rígida de soporte. Las superficies tenían que ser pulidas por dentro, lo que obviamente es mucho más difícil que con espejos ópticos normales que se pulen en el exterior. Por otro lado, los métodos convencionales para medir la calidad de definición de las superficies no eran adecuados. Para formar imágenes X con suficiente resolución es preciso que la superficie colectora esté mucho mejor definida que la de un telescopio óptico, debido a la menor longitud de onda de la radiación. La calidad de las imágenes de rayos X producidas por un telescopio depende además de la estructura cristalina de las superficies reflectantes de los espejos, y de la precisión de la deposición de dicha capa sobre la superficie de vidrio pulido. Si existen defectos se perturba la periodicidad de la red cristalina y se producen errores de fase que causan desplazamientos de la imagen en el plano focal. Una dificultad adicional era, evidentemente, el método para alinear ópticamente los diferentes espejos anidados de un mismo telescopio, de modo que todos ellos produzcan una única imagen.

El primer telescopio, más bien concentrador, de radiación X que voló por encima de la atmósfera terrestre fue construido, ya en 1963, por el grupo de Giacconi para un experimento con un cohete de sondeo. Con él se obtuvieron imágenes de rayos X del Sol sobre película fotográfica, y se probó la eficacia de la incidencia rasante para construir telescopios de rayos X, pero la tecnología para fabricar éstos a gran escala no existía aún. Con el fin de convencer a la NASA de la necesidad de invertir en este campo tecnológico, Giacconi se dedicó a la construcción de un telescopio de rayos X para una de las misiones de la serie *OSO*, que hemos comentado antes. Sin embargo, el instrumento sufrió diversos retrasos y problemas, propios del desarrollo de programas dentro de grandes agencias de financiación, y acabó formando parte del equipo instalado a bordo de la estación espacial *Skylab* que se lanzó en 1973. Las impresionantes imágenes del Sol en rayos X que se obtuvieron con el nuevo telescopio despejaron todas las dudas y abrieron la puerta para el desarrollo de un auténtico telescopio de rayos X, no solares, que finalmente voló en la misión *HEAO 2*. Entretanto, Paul Gorenstein y colaboradores obtuvieron en 1975 la primera imagen de un objeto distinto de nuestro astro rey: el cúmulo de galaxias de Virgo. Emplearon un telescopio Kirpatrick-Baez junto a un contador proporcional. Y el honor de ser los primeros en utilizar un telescopio X de tipo Wolter recayó para el también estadounidense Sanl Rappaport (y colaboradores) en 1977, cuando observaron el residuo de supernova conocido como la nebulosa del Velo en Cisne.

2.8. La misión *Einstein*

El satélite norteamericano *HEAO 2*, cuyo desarrollo se debió en gran manera a los esfuerzos de Gursky, Boldt, Clark, Canizares y Giacconi, fue finalmente lanzado el 13 de noviembre de 1978 por un cohete *Atlas-Centauro* desde la base de Cabo Kennedy, en Florida. Había sido ya concebido por Giacconi y Gursky en 1963. Como hemos dicho, éste fue el primer satélite con capacidad para producir imágenes no solares de rayos X de alta resolución, y no sólo medir el flujo de fuentes puntuales o radiación difusa. El nuevo observatorio de altas energías recibió al poco tiempo el nombre de *Einstein* en conmemoración del primer centenario del nacimiento del famoso físico alemán, Albert Einstein nacionalizado norteamericano años más tarde. Con este satélite comienza una nueva fase de la astrofísica de los rayos X, en la que se lleva a cabo un verdadero análisis de las fuentes capaces de producir esta radiación, a través de imágenes con una resolución angular de 10" y espectros de alta calidad.

La construcción de los grandes espejos de rayos X que se instalaron en *Einstein* fue un gran reto tecnológico de los años setenta que culminó con éxito, y colocó a la Astronomía X a un nivel de resolución casi comparable con la astronomía óptica. El telescopio consistía en cuatro espejos anidados sobre un mismo eje y compuestos, cada uno de ellos, de una sección paraboloide y otra hiperboloide. Con

él se focalizaban rayos X con energías entre 0,25 y 4 keV. La técnica de incidencia rasante lógicamente depende de la energía del fotón y es menos eficaz, es decir se necesitan ángulos cada vez más rasantes, conforme crece la energía. Por eso nos encontramos con una limitación en el rango de los rayos X con energías altas que se pueden focalizar, en función del diámetro del espejo más interior que se pueda contruir dentro del telescopio. La configuración que voló en la misión *HEAO-2* tenía 56 cm de diámetro externo y una distancia focal de 3,5 metros. En la figura 37 mostramos un esquema del satélite.

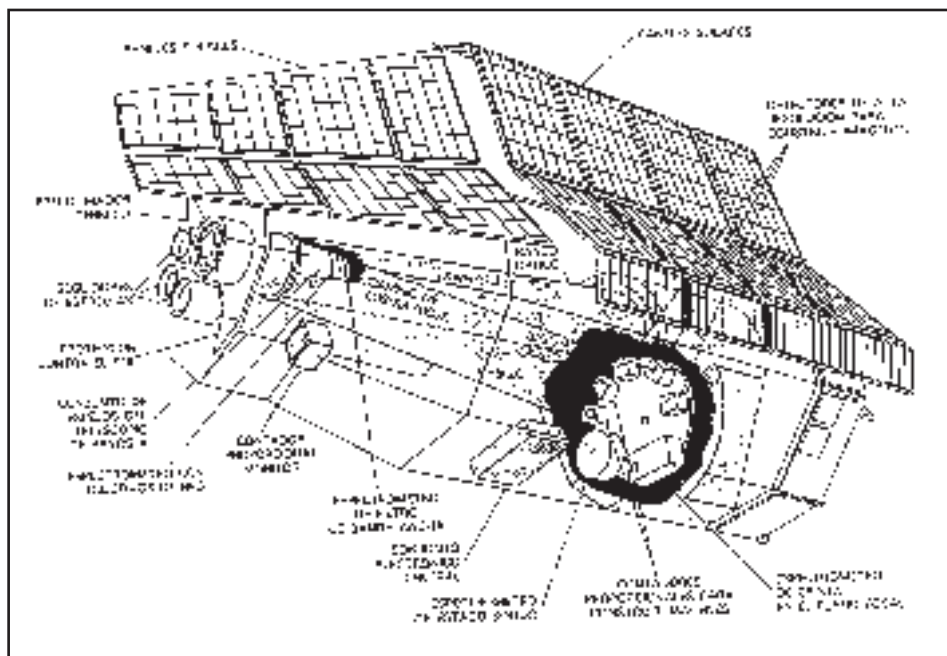


Fig. 37: Esquema del Observatorio HEAO-2 (Einstein).

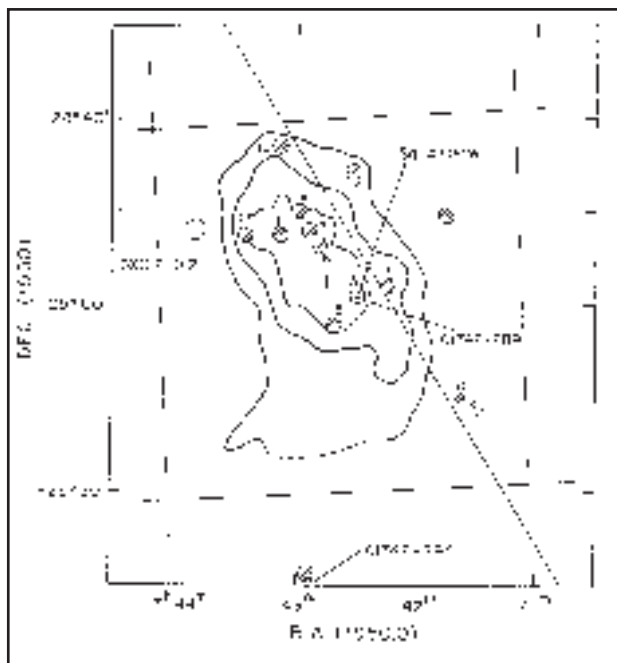
La misión *Einstein* llevaba a bordo, además, cuatro instrumentos detectores sobre una plataforma rotatoria que permitía acceder a cada uno de ellos al plano focal del telescopio de rayos X, según las observaciones que se quisieran hacer en cada momento: dos detectores para la producción de imágenes y dos espectrógrafos. El IPC (*Imaging Proportional Counter*) era un contador proporcional sensible a la posición para la construcción de imágenes con una resolución moderada, del orden de 4', pero con un gran campo de visión de 75' en el rango 0,4-4 keV. Por el contrario, el HRI (*High Resolution Imager*) aprovechaba al máximo la resolución angular proporcionada por el telescopio de rayos X, 2" sobre 25' de campo. Más adelante explicamos el funcionamiento de estos nuevos detectores. La combinación del IPC y del telescopio permitió medir objetos miles de veces más débiles que los observados por *Uhuru*, mientras que la combinación del HRI con

el telescopio permitió obtener imágenes X con una definición sin precedentes, para los objetos más brillantes. A su vez, los espectrómetros posibilitaron el estudio en detalle de la distribución de energía X dentro de ciertos rangos. Uno de ellos (el SSS) estaba formado por un detector de estado sólido enfriado a bajas temperaturas que proporcionaba una resolución espectral de 150 eV, y otro (el BBFS) estaba basado en un cristal de Bragg con una resolución muy alta, de 1 eV, pero a costa de una importante limitación a objetos muy luminosos. Un quinto instrumento, colocado en paralelo con el telescopio principal, era un monitor de rayos X basado en un contador proporcional clásico (MPC) para el estudio de los espectros y la variabilidad de las fuentes más brillantes.

El Observatorio *Einstein*, con más de 5.000 observaciones, no solo estudió en detalle las fuentes más interesantes de los catálogos producidos con anterioridad, sino que detectó rayos X procedentes de nuevos y muy diversos objetos en el Universo. A partir de entonces quedó claro que todos los cuerpos celestes producen rayos X, con mayor o menor intensidad. Se había producido una evidente revolución en la Astronomía X. En sólo 15 años había tenido lugar una transformación similar a la que para la astronomía visible había llevado siglos. Este avance tan rápido, no había sido posible en otras ramas de la astronomía no óptica que se habían abierto en el siglo XX como la radioastronomía y la astrofísica de la radiación gamma. La combinación de un verdadero telescopio de rayos X con instrumentos detectores muy sensibles, había permitido obtener imágenes de alta resolución de fuentes extensas de rayos X y conseguir una ganancia sin precedentes en la sensibilidad a fuentes puntuales débiles. Por primera vez, el satélite *Einstein*, nos permitía penetrar cerca del núcleo de las misteriosas máquinas capaces de producir los objetos más calientes y más violentos del Universo.

Sin embargo, la misión *Einstein*, había abandonado los años de búsqueda de nuevas fuentes mediante el rastreo sistemático de todo el cielo. En vez de tratar de obtener un catálogo más completo que las misiones anteriores, se dedicó, fundamentalmente, al estudio físico de objetos ya conocidos a través de una mejor resolución espectral y espacial. Esta nueva situación se mantendría por varios años debido a nuevos planteamientos observacionales, y a los impresionantes resultados científicos obtenidos con los telescopios de rayos X. Entre otros, podemos citar la identificación del origen sincrotrónico de la radiación X de la nebulosa del Cangrejo, la observación en detalle del centro de nuestra galaxia (figura 38), el descubrimiento de fuentes «supersuaves» (por su espectro) en la Pequeña Nube de Magallanes, la detección de sistemas binarios de rayos X en la galaxia de Andrómeda (M 31), la emisión de rayos X en Cen A a lo largo de chorros de materia que emanan del núcleo, la existencia de una especie de coronas galácticas y las imágenes de la emisión X presente en muchos cúmulos de galaxias. Además se observaron numerosos cuásares, llegándose a descubrir muchos de ellos en regiones aparentemente vacías, lo que sirvió de punto de partida para explicar -al menos parcialmente- la radiación difusa de rayos X como galaxias activas y cuásares no resueltos.

Fig. 38: Observación del centro galáctico realizada por Einstein. La emisión X difusa aparece representada con contornos mientras que las fuentes X puntuales aparecen como círculos, siendo el radio de éstos la incertidumbre en la posición del experimento. De M. G. Watson y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 250, The American Astronomical Society, the University of Chicago Press, p. 147 (1981).



Otra de las características importantes de la misión *Einstein* era que, por primera vez, un satélite había funcionado en régimen de observatorio, es decir, los astrónomos interesados en hacer observaciones con los instrumentos de rayos X instalados a bordo pudieron hacer peticiones de tiempo, al margen de su participación en el desarrollo de los equipos, y obtener respuesta de un comité de asignación de tiempos abierto a toda la comunidad. Así podían participar todos los astrónomos, con ideas frescas, en la utilización de los nuevos observatorios y ampliar enormemente el rango de las aplicaciones y los resultados obtenidos. La misión *Einstein* terminó en abril de 1981, al acabarse el gas de los motores de propulsión del control de posición.

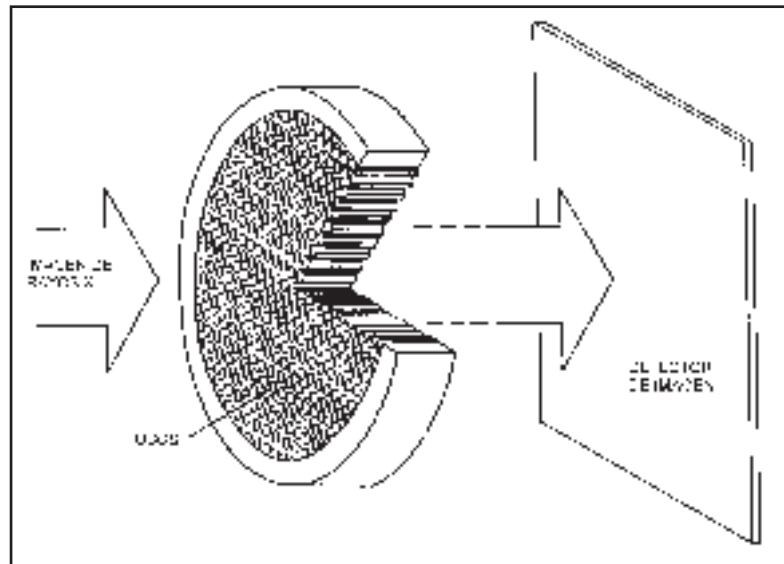
2.9. Nuevos detectores de rayos X

A lo largo de los años setenta, y a pesar de los grandes avances obtenidos con la instalación en órbita de instrumentos de rayos X, continuó con éxito la experimentación con cohetes y con globos. Así, por ejemplo, se determinó la posición de la fuente GX 3+1 a partir de ocultaciones por la Luna, las erupciones intensas tipo «flare» con duraciones de milisegundos de la estrella candidato a agujero negro en Cyg X-1, y la mencionada línea de emisión ensanchada térmicamente del hierro en la binaria de rayos X Cyg X-3.

Todos estos nuevos avances no podrían haberse realizado con los detectores tradicionales basados en la medida de movimientos de cargas en un gas presu-

rizado. Por ello, se desarrollaron detectores diferentes y mejores, basados en la experiencia acumulada en el campo de la astronomía ultravioleta. El HRI de *Einstein* empleaba dos placas microcanal (*Microchannel Plate*) fabricadas mediante el empaquetado de millones de tubos capilares de vidrio muy fino de 1 mm de longitud (ver figura 39). La placa microcanal puede tener un diámetro de unos 10 cm y cada tubo actúa como un convertidor de rayos X en corriente eléctrica, algo así como un colimador de millones de rendijas donde cada una

Fig. 39: Esquema de funcionamiento de una placa microcanal para la obtención de imágenes en rayos X.



de ellas no sólo limita el campo de visión, sino que amplifica la señal recibida. Cada tubo capilar convierte el fotón incidente de rayos X en una avalancha de electrones que sale por el otro extremo como se indica en la figura 40. Para ello, se aplica un potencial a lo largo del tubo capilar de forma que por causa del efecto fotoeléctrico, cuando el fotón X incide sobre el tubo, se libera un

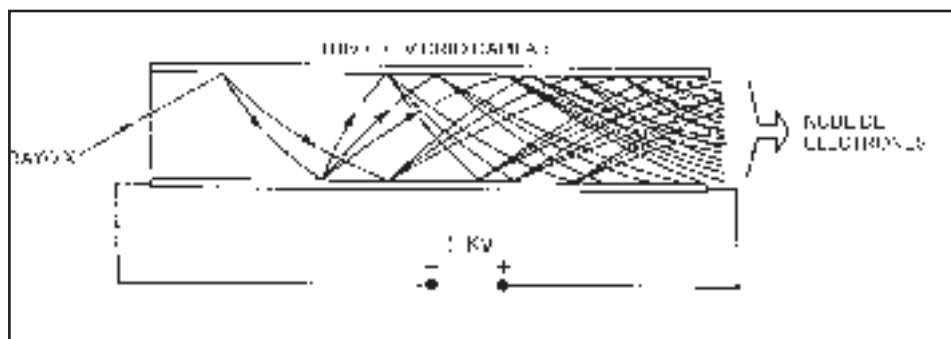


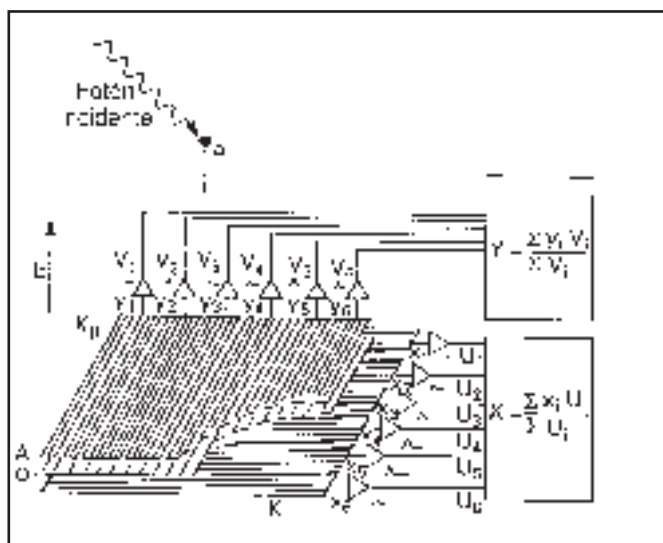
Fig. 40: Esquema de un tubo capilar perteneciente a una placa microcanal. El diámetro típico es de 10 micras

electrón que es acelerado hacia abajo y libera más electrones al ir chocando con las paredes. La cascada de electrones que sale de la placa microcanal se encuentra con un detector de corriente eléctrica sensible a la posición, en este caso una red de hilos paralelos (del orden de 50 por centímetro), y la electrónica de detección alrededor de la red puede identificar tanto la llegada de la cascada de electrones como su posición. La señal de salida de cada uno de los tubos de la placa microcanal, corresponde a un pixel, o unidad de resolución espacial de la imagen completa de rayos X. Mientras las cascadas de electrones no lleguen más rápido que el tiempo que necesita la electrónica para procesar la información (del orden de 100 fotones de rayos X incidentes por segundo) se puede determinar la posición de llegada de los fotones incidentes individuales y reconstruir la imagen X mediante un ordenador. Lamentablemente, la información acerca de la energía del fotón incidente se pierde en el proceso, por lo que se pueden reconstruir imágenes pero no espectros. La resolución temporal es muy alta, de hasta 50 picosegundos, valor al que nunca se llega en la realidad en el caso de instrumentos en satélites, pues la limitación viene dada por las condiciones de la telemetría de los datos. Otra importante propiedad es la inmunidad de las placa microcanal a los campos magnéticos. Así, uno de estos típicos dispositivos no se ve afectado por un campo magnético de 0,7 Teslas. Por lo que respecta a la ganancia, se pueden conseguir valores de hasta 10^6 - 10^8 . Esta es proporcional al cociente entre la longitud frente al diámetro de los tubos capilares: a mayor radio, mayor ganancia. Los valores típicos se sitúan en el rango 75:1 - 175:1. La eficiencia está altamente correlacionada con el ángulo de incidencia y con la energía de los fotones X: a mayor energía, menor es la eficiencia que ya de por sí suele ser baja, entre un 1 y un 10 %. Para aumentarla, lo mejor es introducir un material de buena respuesta al efecto fotoeléctrico, el cual se deposita sobre las paredes internas de cada tubo capilar. Ello hace aumentar la eficiencia hasta un 30 %, y se pueden alcanzar incluso valores de un 60 % para un ángulo óptimo de incidencia.

Por otro lado, como la resolución en el plano focal del telescopio de la misión *Einstein* era muy alta y las placas microcanal no pueden ser muy grandes, el campo de visión de las imágenes HRI eran de algo menos de medio grado de diámetro y, por tanto, no se hacía uso de todo el campo de visión del telescopio, sólo de su parte central. La situación contraria se presentaba con el IPC, ya que se trataba de un sistema de conteo proporcional clásico, en el que se obtiene cierta información acerca de la posición del fotón incidente de rayos X utilizando dos planos de hilos como cátodo, uno a cada lado de los hilos que actúan de ánodo en la cámara de gas presurizado. De esta forma, un fotón de rayos X que entre en el detector creará una avalancha de electrones proporcional a la energía del fotón incidente en el modo usual, pero esta avalancha creará a sí mismo señales inducidas en los hilos del cátodo y, a partir de ellas, se podrá reconstruir electrónicamente la posición del fotón incidente. Estos contadores proporcionales multihilo se denominan

«sensibles a la posición» y son una nueva mejora respecto de los tradicionales contadores proporcionales comentados hasta ahora. El recorrido libre medio de los electrones producidos por la colisión de un fotón X en el gas es muy pequeño, y está dirigido de acuerdo con las líneas del campo eléctrico producido entre el ánodo y el cátodo. Si se distribuyen los ánodos colectores de electrones en el gas de forma adecuada podremos preservar la información acerca del punto de impacto del fotón X. La resolución espacial de estos contadores es de sólo 1', y se obtiene a costa de disminuir la resolución espectral, pero cubre todo el campo de visión del telescopio y es más sensible a flujos débiles de radiación X, por lo que los resultados obtenidos son complementarios de los proporcionados por el HRI. En la figura 41 mostramos un esquema del funcionamiento del sistema de lectura de un detector sensible a la posición.

Fig. 41: Esquema de un contador proporcional sensible a la posición. El fotón incidente es absorbido en el punto a y los electrones se mueven hacia los tres planos multihilo ánodo-cátodo. La llegada de una avalancha de electrones al ánodo positivo (A) produce distribuciones de pulsos eléctricos en los cátodos longitudinal ($K_{||}$) y transversal (K_{\perp}) que permiten deducir la posición (X,Y) de incidencia mediante sumas y divisiones analógicas de las señales.



En lo que se refiere al rango de energías más altas de rayos X, ya hemos visto que no es posible utilizar telescopios focalizadores debido a la necesidad de exigir incidencias extremadamente rasantes, pero se podía mejorar la técnica de los detectores colocados detrás de un colimador clásico. Los nuevos sistemas diseñados para energías hasta los 100 keV (y más) son de tipo semiconductor, basados en el efecto de fotoionización que se produce en estos materiales y la avalancha de cargas generada. La principal ventaja de estos detectores es su gran resolución espectral por la sensibilidad a la energía del fotón incidente. La energía necesaria para liberar un par electrón-hueco es de sólo 2,9 eV en un semiconductor de germanio, mientras que en un detector de gas es de unos 30 eV. Por ello, se crea un mayor número de pares, lo que significa una menor fluctuación estadística y una mayor resolución espectral. Los materiales empleados en estos detectores por semiconducción suelen ser germanio o silicio con algo

de litio. Sin embargo, como cualquier otro detector de este tipo empleado en Astronomía deben mantenerse a baja temperatura, del orden de 77 K o más bajo, con el fin de eliminar la corriente debida a la excitación térmica de las cargas. Ultimamente se están utilizando materiales que funcionan bien a temperatura ambiente, como el yoduro de mercurio (Hg I_2).

El otro tipo de detectores empleados para el estudio de la radiación X de alta energía es el de los contadores de centelleo, basados en redes cristalinas. Convierten la energía de rayos X en luz visible, que es recogida por un fotomultiplicador. Los mas utilizados en Astronomía X son los yoduros de sodio y de cesio, activados por impurezas de talio o sodio. Se pueden fabricar en piezas grandes lo que, unido a su alto poder de detener la radiación X, los hacen productores de luz muy eficientes. NaI(Tl) fue utilizado a principio de la década de 1950, mientras que CsI(Tl) se usó hacia 1965. Este último es más robusto que el primero, altamente higroscópico. Con un grosor de 5 mm, la eficiencia para detener fotones X en el rango 10-100 keV es prácticamente la unidad. Otros materiales, como plásticos y BGO, no se utilizan tanto como los anteriores, debido a su baja eficiencia para detectar rayos X de baja energía. Más bien se emplean como escudo de protección, para reducir el ruido de fondo por medio del método de anticoincidencia, por el que se desechan detecciones que coincidan temporalmente en los dos detectores. En la figura 42, mostramos el esquema básico de un contador de centelleo.

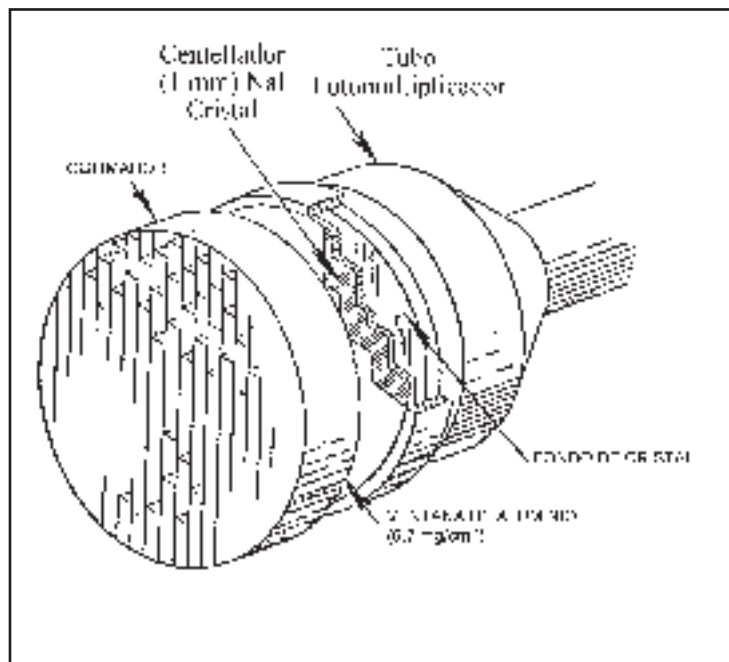


Figura 42. Esquema de un contador de centelleo de yoduro de sodio con un detector de tipo fotomultiplicador.

CUADRO VI. FÍSICA DE LOS CONTADORES DE CENTELLEO.

La producción del pulso luminoso se origina como consecuencia de una serie de procesos bastante complejos de excitaciones y desexcitaciones. El papel de la impureza es producir centros luminiscentes, introduciendo niveles de energía adecuados entre las bandas de valencia y de conducción del cristal. Por debajo de 100 keV, las interacciones del fotón X con NaI o CsI son por medio del efecto fotoeléctrico. Por encima, tiene más importancia el efecto Compton: la dispersión Compton de los fotones de rayos X en el sólido proporciona una energía a los electrones del mismo, transfiriéndose progresivamente esta energía a los átomos mediante la excitación de estados electrónicos ligados o estados moleculares, o bien excitando modos de vibración de la red cristalina. Los estados excitados, a su vez, pasan posteriormente a su situación estable radiando en el visible o en el ultravioleta próximo. Si el medio es transparente a estas longitudes de onda, la medida de la intensidad del centelleo producido da una medida de la energía cedida por el fotón incidente. La fracción de energía X que aparece como luz es de 0,12 en Na(Tl), 0,10 en CsI(Na) y 0,05 para el CsI(Tl), a 20 grados centígrados, pues estos valores dependen fuertemente de la temperatura.

La constante de tiempo para la emisión óptica se encuentra en el rango de los microsegundos para la mayoría de los centelladores inorgánicos, y en el orden de los nanosegundos para los centelladores plásticos. De ese modo, si se rodea uno de los primeros por uno de los segundos (formándose lo que se llama un *phoswich*) y se le adjunta un tubo fotomultiplicador de ruido intrínseco muy bajo para detectar la desexcitación radiativa (luz). Se pueden utilizar las técnicas de discriminación de la forma del pulso eléctrico que proporciona el fotomultiplicador para determinar si la interacción de la partícula de alta energía ocurrió en el escudo (centellador plástico) o en el detector propiamente dicho (centellador inorgánico) siendo pues, un excelente método para reducir el ruido de fondo observado. El inconveniente, tanto en unos como en otro, radica en una resolución energética paupérrima: $\Delta E/E \sim 1.67 \times E^{-1/2}$. Como sustituto del fotomultiplicador, se pueden emplear fotodiodos de silicio, con una mejor eficiencia cuántica pero con mayor ruido a energías inferiores a 20 keV.



CAPÍTULO 3

III DE LA DECADA DE LOS 80 A LOS 90

3.1. La vuelta a las misiones pequeñas de rayos X

Al terminar las misiones *SAS-3* y *HEAO-1* en 1979 y *Einstein* en 1981, comenzó un largo intervalo de tiempo con escasas misiones norteamericanas de relevancia en el campo de los rayos X. Este descenso de actividad, a pesar de los enormes éxitos acumulados, facilitó la entrada de otros países en la investigación del Universo X. De hecho, durante la vida operacional del *HEAO-2* ya se lanzaron dos satélites de rayos X: el japonés *Hakucho* y el británico *Ariel-6*. Se empezaron así a poner en órbita una serie de misiones más modestas que el observatorio *HEAO*, dirigidas al estudio de problemas concretos planteados como resultado de misiones anteriores, que abrieron el campo de la Astronomía X a nuevos grupos y países al margen, hasta entonces, de las nuevas tecnologías.

La misión *Hakucho* «Cisne», en cierto modo similar al *SAS-3* norteamericano aunque algo menos sensible, representó el comienzo de la Astronomía X en el Japón y la presencia de sus investigadores, de forma continua a partir de entonces, en este campo de investigación. Este primer satélite de rayos X, llamado durante la fase de desarrollo *Corsa-B*, fue lanzado por la agencia espacial japonesa, ISAS, el 21 de febrero de 1979 desde el Centro Espacial de Kagoshima. En la figura 43 mostramos una vista general del satélite que era muy sencillo y ciertamente recordaba los inicios de la Astronomía X en Estados Unidos. Estaba estabilizado solamente por rotación y transportaba 11 contadores proporcionales de tres tipos, algunos de ellos con colimadores modulados, que observaban el cielo en el eje de giro con campos de visión entre 8° y 18° . Cubrían un amplio rango de energías: 0,1-1 keV (dos con ventana de propileno), 1,5-30 keV (cuatro) y 10-100 keV (uno). Estos siete estaban apuntando en la dirección del eje de rotación. Los cuatro restantes lo hacían en direcciones laterales. De esta forma se podían hacer observaciones con cierto apuntado y se consiguieron interesantes resultados en



Fig. 43: Vista del satélite japonés
Hakucho.

el estudio de fuentes eruptivas de rayos X. *Hakucho* pesaba menos de 100 kg y estuvo en funcionamiento hasta 1984.

Por su parte, el satélite *Ariel-6* (*UK6* en la fase de desarrollo) era el último de una serie muy interesante de pequeñas misiones científicas para el estudio de altas energías en el Reino Unido. El satélite (ver figura 44) estaba estabilizado por rotación y tenía unos 150 kg de peso. Fue lanzado el 2 de junio de 1979 desde las islas Wallops en Estados Unidos como una misión prioritariamente dedicada al estudio de la radiación cósmica, es decir de las partículas muy energéticas que viajan a través de la galaxia pero, sin embargo, llevaba a bordo dos pequeños instrumentos de rayos X. El primero de ellos usaba reflectores de incidencia rasante para aumentar la capacidad colectora de unos contadores proporcionales con ventana delgada sensibles a los rayos X entre 0,25 y 2 keV, mientras que el otro era un monitor de fuentes variables de rayos X en el rango entre 1 y 50 keV con alta resolución temporal y colimado a un campo de visión de $3^\circ \times 3^\circ$. Ambos experimentos de rayos X estaban montados sobre el eje de rotación por lo que disponían de cierta capacidad de apuntamiento. Aunque la misión tuvo muchas dificultades durante su vida operativa, debido a fuertes interferencias de tipo electromagnético, se obtuvieron interesantes resultados en el estudio de espectros de núcleos activos de galaxias y la determinación de periodos en púlsares. Problemas con las baterías y el sistema de almacenamiento de datos forzaron la terminación de la misión en febrero de 1982.

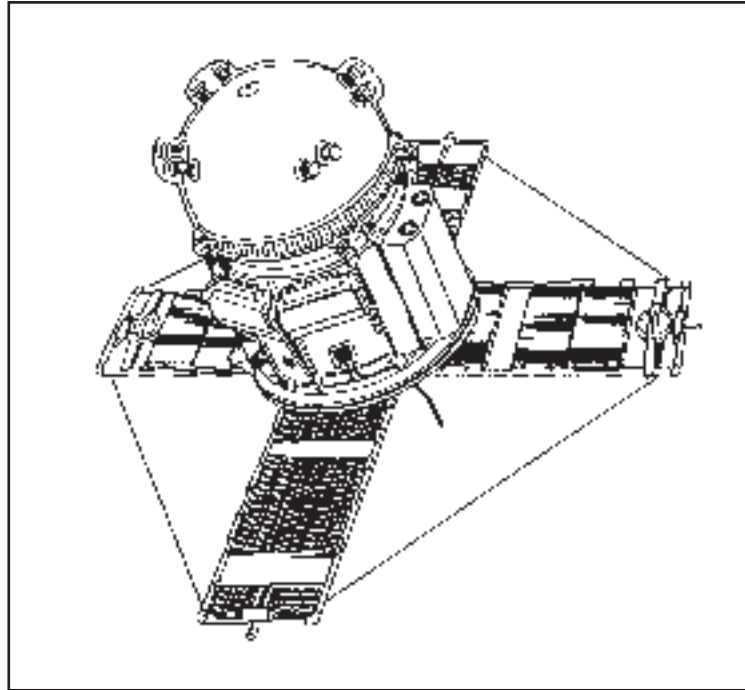


Fig. 44: Esquema
del satélite británico
Ariel-6.

A pesar de lo mencionado anteriormente acerca de la poca actividad norteamericana en la investigación de los rayos X cósmicos durante los años ochenta, la comunidad científica de Estados Unidos, relativamente grande como consecuencia de las misiones de los años anteriores y deseosa de proseguir sus investigaciones, aprovechó varios satélites de la NASA para instalar algunos experimentos pequeños. Así, la nave *P78-1* (dentro del programa americano de Pruebas Espaciales) fue lanzada el 24 de febrero de 1979 y estuvo operando hasta 1985. Incluía en su carga útil un monitor de rayos X, formado por dos contadores proporcionales de argón sensibles al rango 3-10 keV, colimados para dar un campo de $3^\circ \times 30^\circ$ (figura 45), lo que permitía localizar fuentes con una incertidumbre de 1° . Igualmente el 14 de febrero de 1980 se lanzó la misión del máximo solar SMM (*Solar Maximum Mission*) que llevaba a bordo instrumentos para la observación del Sol en rayos X (ver figura 46). Éstos eran dos espectrómetros, para rayos X duros y blandos, y una cámara de rayos X duros con cierta capacidad para obtener imágenes y espectros. El satélite, que contenía una serie adicional de instrumentos para observar el Sol en el rango infrarrojo, ultravioleta y de rayos gamma, sufrió una avería importante del control de posición y apuntado en diciembre de 1980. En abril de 1984, se convirtió en la primera misión en ser reparada en órbita gracias a la intervención de dos astronautas a bordo del vuelo número 11 de la lanzadera espacial norteamericana *Challenger*. La primera misión del Laboratorio Espacial norteamericano (el *Spacelab-1*) tuvo lugar del 28 de noviembre al 8 de diciembre

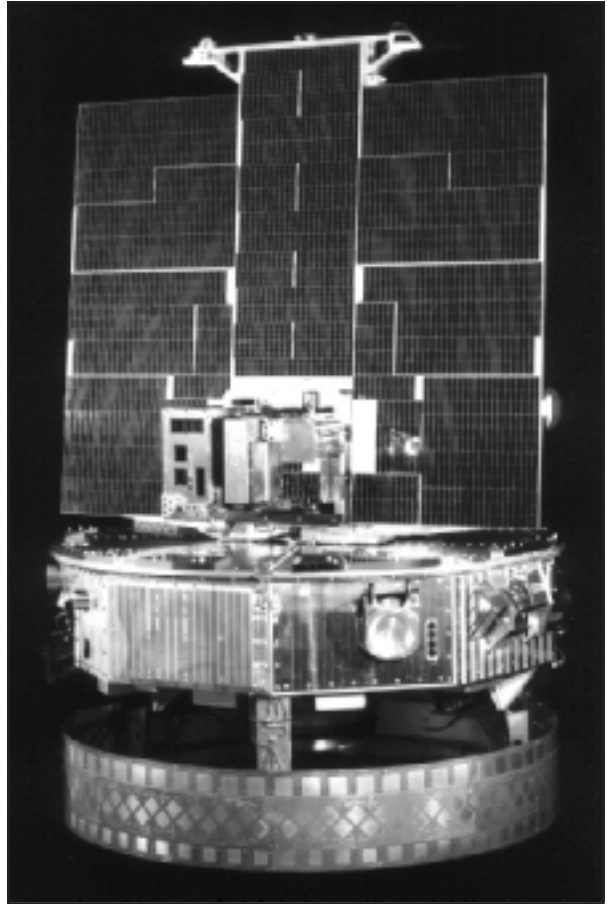


Fig. 45: La misión P78-1.



*Fig. 46: El Observatorio
norteamericano SMM.*

de 1983. Uno de los experimentos era un espectrómetro de rayos X que operaba en el rango 2-30 keV, y obtuvo valiosos datos para una docena de fuentes, como Cyg X-2, el cúmulo de galaxias de Coma Berenice, etc. Durante el año 1985 se aprovecharon dos vuelos más de la lanzadera espacial para llevar detectores de rayos X fuera de la atmósfera terrestre, a pesar de la corta duración de estas misiones tripuladas. Uno de ellos fue el experimento SPARTAN-1, lanzado con la nave *Discovery* el 17 de junio de 1985, que consistía en una plataforma que volaba separadamente de la lanzadera durante dos o tres días y luego era recogida (figura 47). Llevaba dos detectores en el rango 1-12 keV que cubrían un campo de $5' \times 3^\circ$, lo que le permitió la observación del centro galáctico y del cúmulo de galaxias



Fig. 47: SPARTAN-1 asido al brazo mecánico del transbordador espacial (Cortesía de la NASA).

de Perseo. El 29 de julio de 1985, se lanzó el experimento SL-2 XRT dentro del *Spacelab-2* (figura 48) a bordo de la lanzadera espacial *Challenger*. Este experimento era un conjunto de dos telescopios de rayos X con máscara codificada, cuyo funcionamiento comentaremos más adelante, para poder obtener imágenes con cierta resolución en el rango de energías entre 2,5 y 25 keV y un campo de $6^\circ \times 6^\circ$. Hizo observaciones de ocho cúmulos de estrellas, un residuo de supernova y -cómo no- del centro de nuestra galaxia. En abril de 1993 se volvió a poner en el espacio el SPARTAN, para el estudio de la corona y el viento solar, mediante un vuelo de la nave *Discovery* dedicada fundamentalmente a la misión *Atlas 2* de análisis de la atmósfera terrestre.

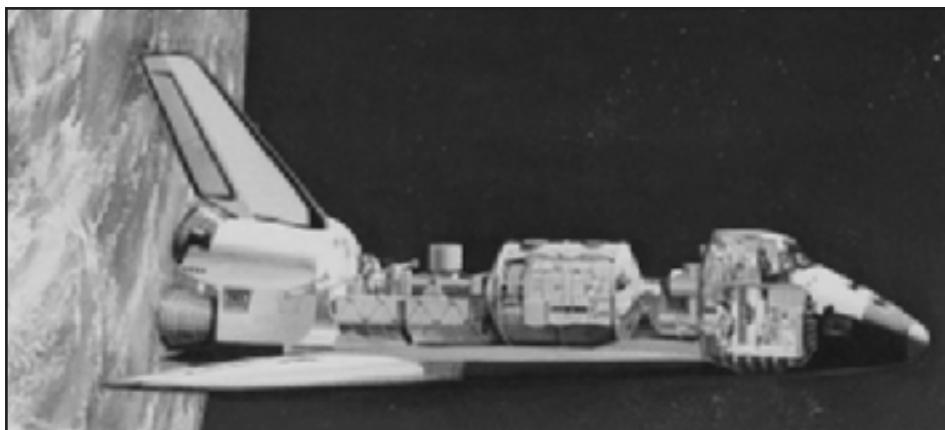
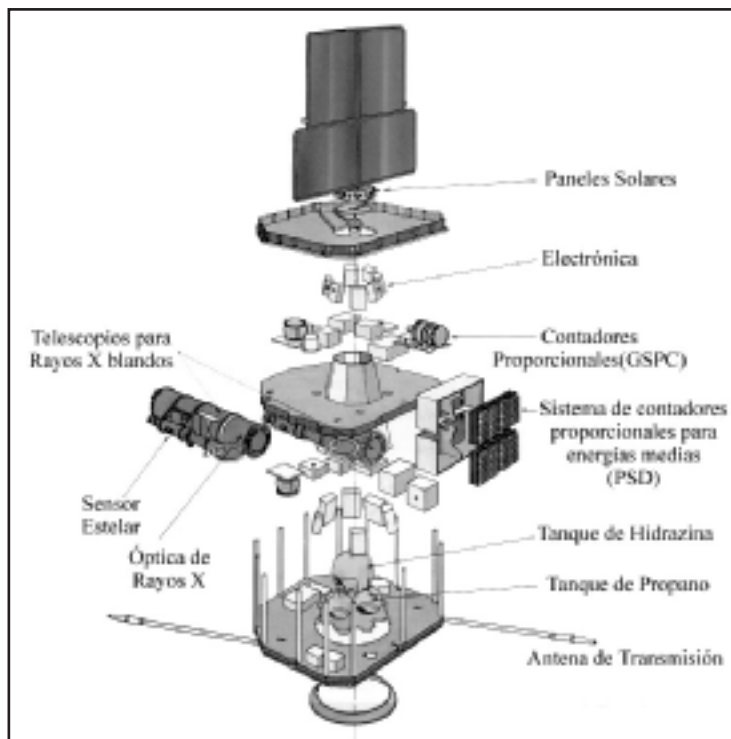


Fig. 48: El transbordador espacial con el laboratorio Spacelab.

3.2. La primera misión europea importante: *Exosat*

Mientras tanto, en Europa se habían acumulado una serie de experiencias en varios países, principalmente el Reino Unido y Holanda. Como desarrollo en común se había puesto en órbita la misión *Iris* (*ESRO-2B*), y el siguiente paso tenía que colocar al viejo continente al nivel de los demás competidores lo que ocurrió con el lanzamiento en 1983 del satélite europeo *Exosat* que, aunque presentó algunos problemas al principio, significó un avance decisivo para la Astronomía X del momento. Lamentablemente, *Exosat* también es un ejemplo de la complicación que puede sufrir una misión desarrollada en el seno de una agencia grande y burocratizada como la ESA, problemas que también se habían detectado en la NASA a lo largo de los años setenta. De hecho, la misión *Exosat* comenzó su aventura en 1969, cuando se propuso como un satélite relativamente pequeño para la localización de fuentes de rayos X mediante ocultaciones por la Luna. Este proyecto se llamaba *Helos* (*Highly Eccentric Lunar Occultation Satellite*) y fue rebautizado en 1973 como *Exosat* al incorporarse a la misión algunas posibilidades de apuntado a fuentes individuales, lo que duplicó el peso del satélite. Posteriormente, dificultades financieras y de gestión del programa retrasaron el lanzamiento de la misión a 1977, por lo que ya se empezaron a conocer los resultados de las misiones *Uhuru* y *Ariel-5* y se preparaba el lanzamiento del satélite norteamericano *Einstein*. Era obvio que el programa *Exosat* original ya estaba obsoleto, y se hizo una nueva definición del proyecto, haciéndolo más ambicioso para mantener unos objetivos científicos suficientemente competitivos. Esto retrasó nuevamente el lanzamiento, que tuvo lugar finalmente el 26 de mayo de 1983, y aumentó el peso del satélite hasta 500 kg. En la figura 49 mostramos la configuración del satélite *Exosat* en su forma final.

Fig. 49: El satélite europeo Exosat: esquema de los distintos subsistemas.



Exosat era un satélite estabilizado en tres ejes con varios instrumentos a bordo que podían ser apuntados a diferentes puntos del cielo. Por un lado llevaba contadores proporcionales con un nuevo sistema de colimación, mediante tubos cilíndricos, que permitía reducir el campo de visión a valores muy pequeños ($45'$) y se utilizaban para el estudio de fuentes individuales en el rango de energías entre 1,5-20 keV y 5-50 keV, según fuera argón o xenón el gas empleado. Por primera vez se pudo apuntar a una fuente concreta, y medir su radiación en un rango amplio de energías, durante intervalos de tiempo largos. Simultáneamente, parte de la red de contadores proporcionales se podía apuntar a una zona del cielo adyacente (a unos 2° del eje principal), libre de fuentes, con el fin de obtener medidas del fondo de cielo y aumentar la relación señal/ruido. Este instrumento, conocido como experimento de energía media (ME), llevaba una red de ocho contadores proporcionales con ánodo multihilo que permitía una resolución temporal de hasta 10 microsegundos, de forma que podía estudiar en detalle púlsares y otras fuentes variables muy rápidas. Cada contador tenía el sistema de colimadores mencionado y dos zonas separadas, con gas argón y xenón respectivamente, para absorber fotoeléctricamente los fotones incidentes según la energía de los mismos. Las dos capas de gas, separadas por una ventana intermedia de berilio se encontraban además atravesadas por diferentes planos de ánodos y cátodos, con el fin de medir con cierta precisión la posición de las señales eléctricas generadas.

Otro instrumento a bordo del *Exosat* era un telescopio doble para la obtención de imágenes de rayos X en el rango entre 0,04 y 2 keV (LE), con una resolución de 20'' en el campo de 2,2° y redes de transmisión (TGS) para facilitar cierta resolución espectral. Cada telescopio utilizaba dos espejos anidados formados por un sector paraboloide y otro hiperboloide, según la configuración Wolter 1, con una distancia focal de un metro (ver figura 50), y estaba equipado con dos detectores en un placa rotatoria mediante la que podían colocarse de forma alternativa en el plano focal. Uno de los detectores era una configuración de dos placas microcanal (CMA) y el otro un contador proporcional sensible a la posición (PSD). Igual que ocurrió con los instrumentos HRI e IPC del satélite *Einstein*, CMA proporcionaba buena resolución espacial a costa de la información espectral mientras que PSD permitía obtener información espectral, pero una resolución espacial limitada.

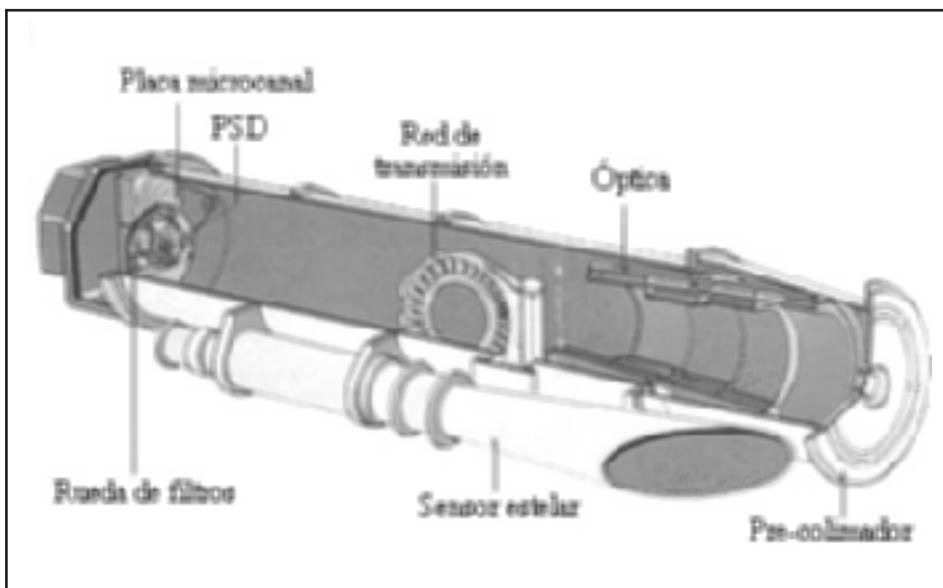


Fig. 50: Esquema de los telescopios de rayos X a bordo del *Exosat*.

El tercer equipo de medida a bordo del satélite *Exosat* era un contador proporcional de centelleo en gas (GSPC), que proporcionaba una mejor resolución espectral que los contadores proporcionales normales, entre 2 y 40 keV. Los contadores proporcionales GSPC convierten los fotones incidentes de rayos X en fotoelectrones que son acelerados en el campo eléctrico del detector, hasta que tienen la suficiente energía como para excitar los átomos del gas. Los átomos excitados se combinan para formar moléculas que son desexcitadas espontáneamente emitiendo fotones ultravioleta. Estos fotones pueden ser detectados con un fotomultiplicador, cuya señal de salida es proporcional a la energía del fotón incidente de rayos X. La técnica

es algo parecida a la que se utiliza en los contadores de centelleo de estado sólido. Aunque de diseño más complicado, los detectores GSPC tienen mejor resolución espectral que los clásicos contadores proporcionales. El contador proporcional GSPC a bordo de la misión *Exosat*, cuyo esquema puede verse en la figura 51, fue un buen ejemplo de lo que se puede hacer con estos detectores en el campo de la espectroscopía X de banda ancha. Se utilizó para obtener espectros como el del resto de la supernova de Tycho (capítulo IV) y que, además de un continuo térmico muestra líneas de emisión de alta excitación de algunos iones pesados.

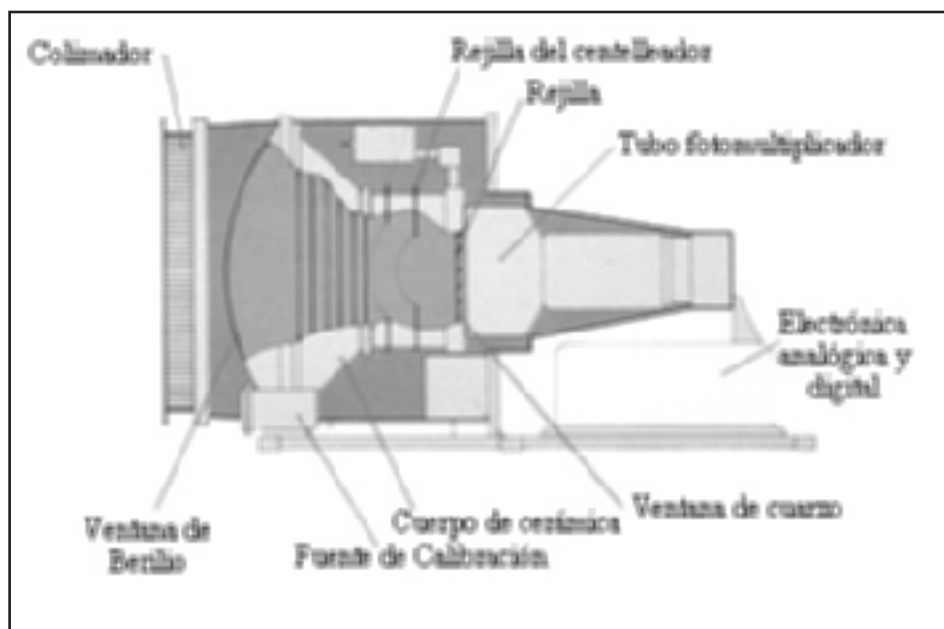


Fig. 51: Esquema del contador proporcional por centelleo en un gas (GSPC) a bordo del *Exosat*.

Una característica especial de la misión *Exosat* era su órbita fuertemente excéntrica con un periodo orbital de 90 horas. Esto implicaba un mayor nivel de ruido debido al paso por los cinturones de radiación y la actividad solar, por lo que se había introducido un sistema especial de protección por anticoincidencia en los detectores de rayos X. Además permitía también la observación de un mismo objeto de forma ininterrumpida durante algunos días y, por tanto, estudiar en detalle la variabilidad de las fuentes de rayos X. Las misiones en órbita terrestre baja, sufren ocultaciones por la tierra de hasta 30 minutos cada aproximadamente 95 minutos que dura la órbita. Por otro lado, los paneles solares eran móviles y permitían apuntar al Sol en cualquier posición del satélite. En la figura 52 mostramos el satélite antes de ser lanzado al espacio.

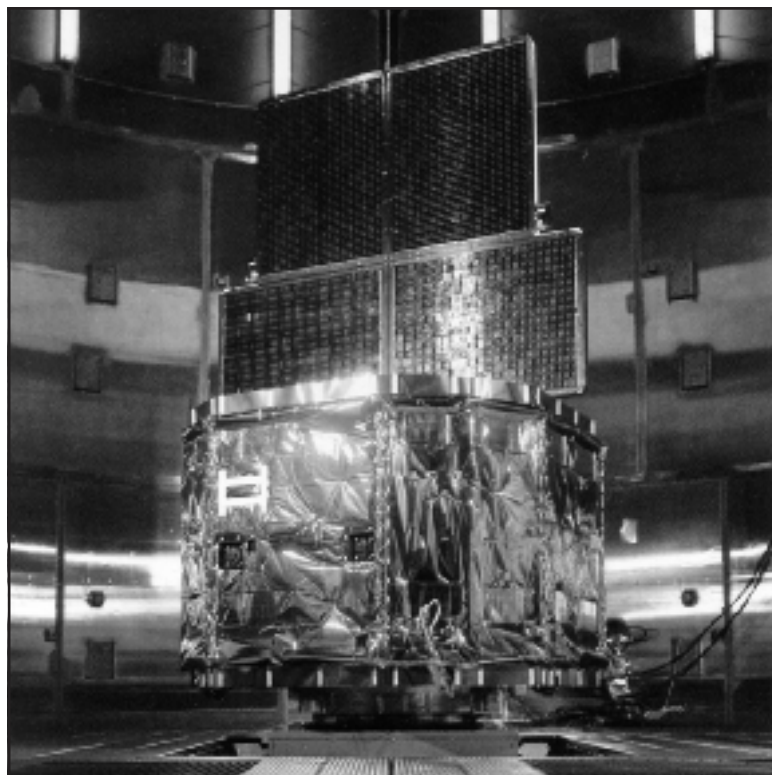
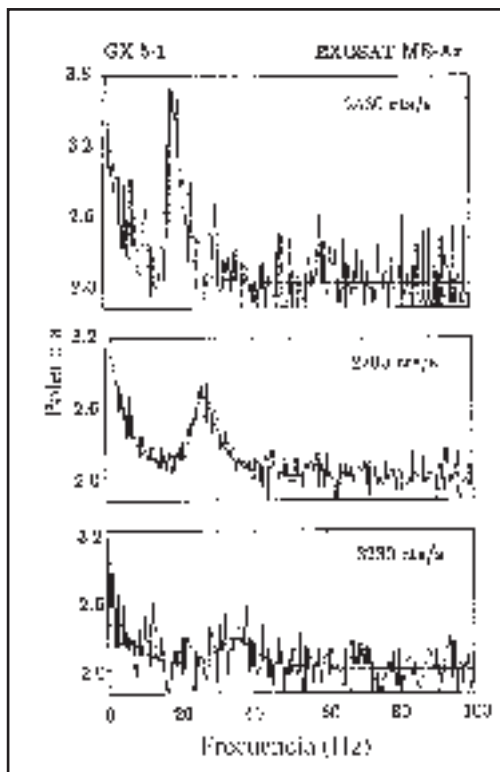


Fig. 52: El Exosat antes de ser lanzado al espacio.

Los objetivos que habían definido la misión eran: determinar la posición de fuentes de rayos X, obtener imágenes de fuentes extensas, distinguir fuentes puntuales en objetos extensos (en galaxias o en cúmulos), hacer medidas espectroscópicas de resolución moderada y estudiar la variabilidad temporal de las fuentes de rayos X en un rango amplio de milisegundos a días. *Exosat* se utilizó ampliamente para estudiar variaciones temporales de rayos X, siendo el descubrimiento más importante el realizado por el holandés Michiel van der Klis cuando advirtió en 1985 la existencia de oscilaciones cuasi periódicas (QPOs) en la fuente GX 5-1 (ver figura 53), a la cual se irían sumando en los meses sucesivos otros sistemas binarios de rayos X. Pero también aportó importantes avances en el estudio de sistemas binarios con emisión X coronal, variables cataclísmicas, estrellas enanas blancas, sistemas con estrellas de neutrones y núcleos activos de galaxias. Además realizó las primeras observaciones en el extremo ultravioleta (100-300 Å). La forma de operar el satélite permitió su funcionamiento como un observatorio astronómico y asignar tiempo de observación a los grupos científicos que lo requerían, de acuerdo con lo criterios de un comité de asignación de tiempos. Además se generó un amplio archivo de datos, con 1.780 observaciones de diferentes objetos, del cual todavía se están extrayendo resultados científicos

Fig. 53: Oscilaciones cuasiperiódicas observadas por Exosat en 1985. De M. van der Klis y colaboradores, *Nature*, 316, McMillan, Londres, p. 225 (1985).



de gran interés a través de nuevos análisis de las observaciones, a pesar de que la vida operativa del satélite terminó en abril de 1986. La misión *Exosat* colocó de esta forma a Europa en el frente más avanzado, aprovechando la deceleración de Estados Unidos en este campo de la investigación del Universo en rayos X. La siguiente misión europea importante en este rango espectral, *XMM*, está prevista para 1999 (ver capítulo VI). Mientras tanto, se ha dado paso a que se introduzcan otros países en el mismo campo, como la antigua Unión Soviética y, especialmente, Japón, así como el desarrollo de programas a nivel nacional en países europeos como el Reino Unido, Alemania, Francia e Italia. Las comunidades científicas, una vez han empezado el estudio de objetos astrofísicos en un nuevo rango espectral, no quieren dejar de utilizar cualquier medio a su alcance para continuar las investigaciones y esto ocurrió en Europa, como había sucedido poco antes en Estados Unidos, al margen de las prioridades industriales o financieras que pudieran darse en cada país o en las grandes agencias espaciales. Por ello, los principales grupos europeos, después de la misión *Exosat*, participarían en varias misiones a nivel nacional y colaborarían con japoneses, norteamericanos y rusos en nuevos programas.

3.3. Las misiones japonesas en los años ochenta

Manteniendo siempre unas características propias y una pertinaz continuidad en el lanzamiento de misiones pequeñas (una cada cinco años), cada vez ligeramente más sofisticadas, los japoneses continuaron y completaron con gran éxito muchos de los estudios realizados hasta entonces en Estados Unidos, Europa o la Unión Soviética. En particular, la década de los ochenta sería aprovechada por los científicos japoneses para llevar a cabo una serie de misiones de gran importancia para el desarrollo de la Astronomía X. Así, en 1981, se lanzó un pequeño satélite, llamado *Hinotori*, para el estudio de las fulguraciones del Sol en rayos X y se inauguró una serie de misiones bajo el nombre de *Astro* en la Agencia Espacial Japonesa ISAS. Los instrumentos a bordo eran muy simples pero prepararon la tecnología necesaria para embarcar equipos más ambiciosos en el siguiente satélite de la serie, *Astro-B*.

En efecto, la siguiente misión de rayos X, *Astro-B*, a la que se le puso el nombre de *Tenma* «Pegaso», fue lanzada el 20 de febrero de 1983 y estuvo en funcionamiento hasta 1984. En la figura 54 mostramos una visión general del satélite que, al igual que *Hakucho*, también estaba estabilizado por rotación y tenía los instrumentos colocados en la parte superior para aprovechar el eje de giro. El objetivo de la misión era el estudio de fuentes de rayos X con una buena resolución temporal y espectral. Los equipos instalados a bordo incluían unos contadores proporcionales de centelleo en gas (GSPC) para el rango entre 2 y 60 keV con una resolución excepcionalmente buena, del orden del 9,5% a 6 keV. Otro instrumento, sensible al rango entre 0,1 y 2,0 keV, consistía en un par de espejos para focalizar la radiación en un campo de $0,2^\circ \times 5^\circ$, con contadores proporcionales sensibles a la posición (PSPC). Además, *Tenma* llevaba

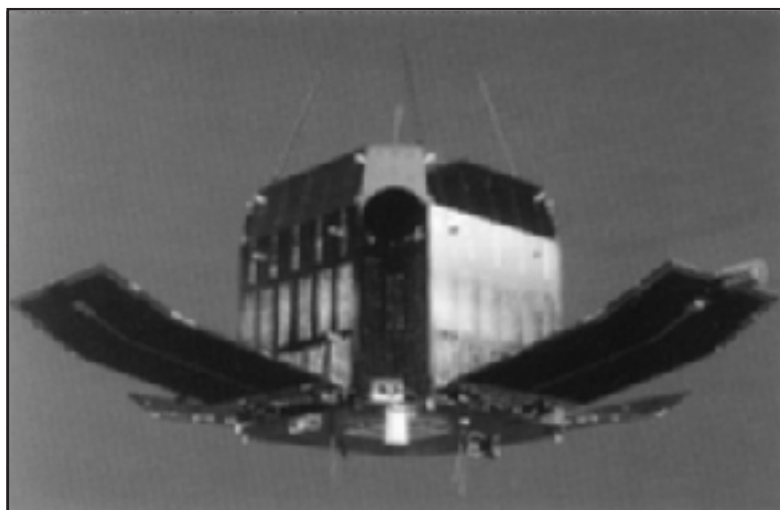


Fig. 54: El satélite japonés Astro-B (Tenma).

un monitor de campo amplio (45° de radio) para la detección de fuentes transitorias de rayos X en el rango 2-10 keV, y otro monitor para los cinturones de radiación y, ocasionalmente, estudiar explosiones cósmicas de rayos gamma. Al poder estudiar la emisión del hierro en rayos X se detectó por primera vez una de las líneas de este elemento a 6,4 keV en sistemas binarios poco masivos y en el disco de la Galaxia. Otra línea, ésta a 6,7 keV, se observó en púlsares y en núcleos galácticos activos. La línea a 6,4 keV (o línea de Fe «frío») se cree que se forma cuando rayos X calientan materia fría, mientras que la línea a 6,6-6,7 keV se piensa que se origina en un plasma muy caliente.

Finalmente, la Agencia Japonesa ISAS lanzó al espacio la misión *Ginga* «Galaxia» el 5 de febrero de 1987. Siguiendo la tradición, los satélites japoneses tienen únicamente un número de serie hasta que son colocados en posición operativa y comienzan las observaciones. Entonces, son bautizados con un nombre específico, como ya hemos visto en el caso de *Astro-B*, que posteriormente se llamó *Tenma*, y *Ginga*, que anteriormente se llamaba *Astro-C*. Esta vez se trataba de un satélite estabilizado en tres ejes, con capacidad de apuntado para observar objetos seleccionados durante intervalos de tiempo largos, equipado con un conjunto de ocho contadores proporcionales de grandes dimensiones y bajo ruido intrínseco (LAC). Estos detectores eran sensibles al rango entre 1 y 37 keV, y disponían de un sistema de colimación mecánica de $1^\circ \times 2^\circ$. Cada contador tenía una ventana de berilio sujeta por el propio colimador y disponía de una sistema de anticoincidencia para disminuir el ruido de fondo. El gas era una mezcla de argón y xenón con un 5% de dióxido de carbono, presurizada a 2 atm y con una temperatura de 20°C . El satélite era una caja rectangular de aproximadamente, $1 \times 1 \times 1,5$ metros (ver figura 55) que pesaba 420 kg, mientras que la carga útil tenía un peso de 105 kg.

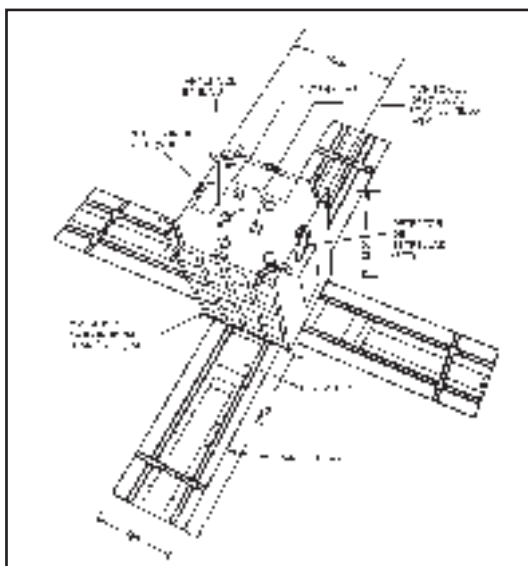


Fig. 55: Esquema del satélite japonés Astro-C (Ginga).

Ginga ya era un auténtico observatorio de rayos X que estuvo en funcionamiento hasta octubre de 1991 y representó un avance considerable de la tecnología japonesa. Durante su vida operativa observó unas 350 fuentes puntuales, tanto galácticas como extragalácticas. El uso de contadores proporcionales de gran área (LAC) y las posibilidades de apuntado hicieron que *Ginga* proporcionase medidas de excepcional sensibilidad en rangos espectrales que no eran alcanzables con los sistemas de espejos de incidencia rasante. También se incluyeron a bordo del satélite un monitor de campo amplio (ASM), formado por dos contadores proporcionales en un campo de visión colimado de $1^\circ \times 45^\circ$, para detectar fuentes transitorias en el mismo rango entre 1,5 y 35 keV. Y también un detector de erupciones de radiación gamma (GBD) mediante un contador de centelleo y otro proporcional, operando en el rango entre 1,5 y 400 keV, para tratar de hacer la conexión física con los procesos más energéticos. *Ginga* realizó unas 1.000 observaciones de 350 objetos diferentes. Una de las aportaciones más interesantes, sin embargo, fue fruto de la casualidad. Al poco de ser puesto en órbita tuvo lugar la explosión de una supernova en la Gran Nube de Magallanes, SN1987A, el 23 de febrero de 1987, y los dispositivos a bordo del satélite descubrieron rayos X de esta fuente en julio de 1987. Entre sus hallazgos más importantes, caben destacar el de dos novas de rayos X (en 1988 y 1989) y el de una docena de nuevos púlsares de rayos X. La observación espectroscópica de algunos púlsares X reveló líneas de absorción debidas al efecto de fuertes campos magnéticos, ya descubiertas en 1976 por el alemán Joachim Trümper y colaboradores en la observación de Her X-1. *Ginga* también las detectó en V0331+53 (figura 56). Complementando estos resultados, el satélite japonés contribuyó con nuevas aportaciones al estudio de variaciones temporales y espectrales de fuentes eruptivas, transitorias, oscilaciones cuasiperiódicas, púlsares, candidatos a agujeros negros, cúmulos de galaxias, núcleos activos de galaxias, etc.

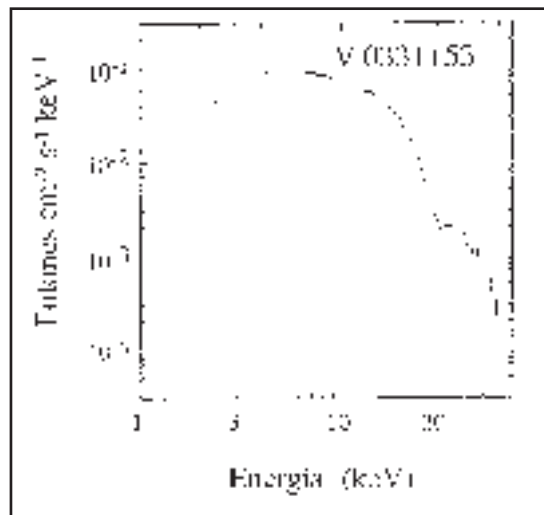


Fig. 56: Línea de absorción alrededor de 30 keV observada en el espectro del púlsar de rayos X 0331+53 (una HMXB de tipo Be) por *Ginga*.

En muy poco tiempo, la Agencia Espacial Japonesa ISAS, había recuperado el tiempo perdido en el desarrollo de instrumentación espacial para investigar el Universo en rayos X, y se había colocado entre los países más avanzados en esta rama de la Astronomía. Además había imprimido un carácter propio a su programa de investigación con objetivos concretos, un programa de lanzamientos estable y continuado, una filosofía basada en misiones pequeñas en vez de grandes observatorios y una capacidad propia de poner los satélites en órbita, y llevar a cabo las actividades de control y seguimiento de las misiones.

3.4. Las misiones rusas

El programa soviético para astronomía de rayos X no fue inicialmente muy ambicioso y ya hemos comentado el experimento FILIN a bordo de la estación *Salyut-4* en los años setenta. La mayoría de los experimentos siguientes también hicieron uso, a la hora de ser embarcados, de las plataformas disponibles para otras misiones. Por ello, estos instrumentos sólo dispusieron de una cantidad de tiempo de observación muy limitada, pues dichas misiones tenían otras prioridades. Además, durante la década de los años setenta y ochenta, los científicos rusos estuvieron más interesados en la observación de fuentes de emisión de radiación gamma, más energética que los rayos X. Estos experimentos dominaron claramente sobre los que se dedicaban al estudio de los rayos X, de los que casi exclusivamente se hicieron medidas en el rango duro. Precisamente, en las sondas *Venera 11* a *14*, que fueron lanzadas en dirección a Venus en septiembre de 1978 (la *11* y la *12*) y en octubre de 1981 (la *13* y la *14*, figura 57), el grupo de Leningrado (Evgeni Mazets, Sergei Golenetskii y otros) instalaron unos experimentos, denominados KONUS. Solamente las *Venera 13* y *14* aterrizaron en Venus en marzo de 1982. Aparte de confeccionar un extenso catálogo de explosiones cósmicas de rayos gamma, la mayor contribución fue la fuente de rayos gamma suaves que descubrieron el 5 de marzo de 1979. La emisión de rayos X, con pulsaciones periódicas de 8,1 s, provenía de una de las 3 fuentes repetitivas de rayos gamma suave que hoy se conocen, SGR 0525-66 (figura 58). De esta forma quedó demostrada la necesidad de acompañar las observaciones en el rango gamma con estudios de las mismas fuentes en rayos X. A su vez, en la estación *Astron*, lanzada el 23 de marzo de 1983 en una órbita muy excéntrica (figura 59), ya se había instalado un experimento, el SKR-02M, basado en un contador proporcional de grandes dimensiones para la medida de rayos X en el rango entre 2 y 25 keV con un campo de visión de $3^\circ \times 3^\circ$ y con diez canales de resolución espectral. Observó Her X-1 de manera preponderante, aparte de otras fuentes en Orión, Taurus y Leo.

El 31 de marzo de 1987, los rusos pusieron en órbita un observatorio de rayos X a bordo del módulo *Kvant* «Quantum», que fue enganchado a la estación espacial *Mir* «Paz», en ruso, tal como aparece en la figura 60. Dicho observatorio

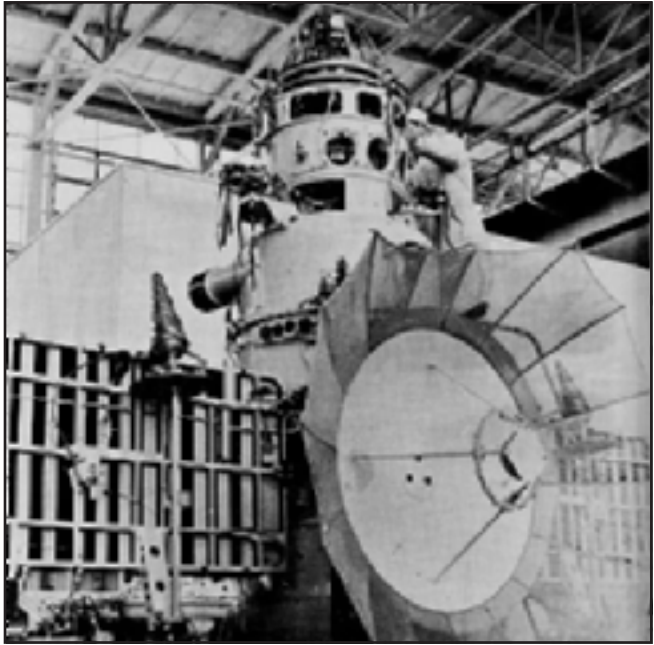


Fig. 57: Una de las anteriores Venera durante las pruebas previas al lanzamiento.

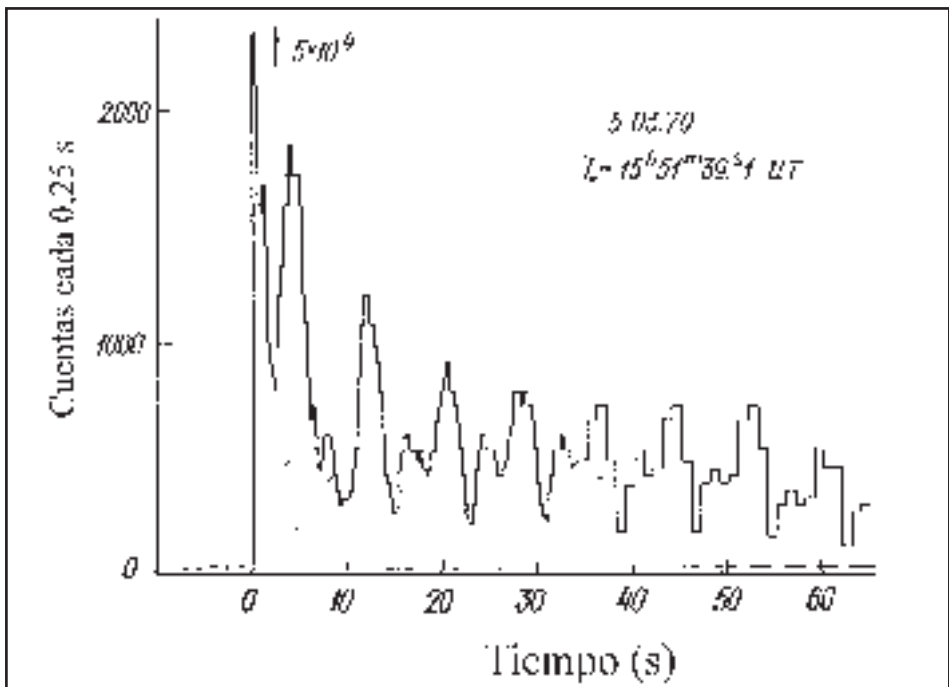


Fig. 58: Pulsaciones de 8,1 s observadas por las Venera 11 y 12 en SGR 0525-66. De E. P. Mazets y colaboradores, *Astrophysics and Space Science*, 84, D. Reidel Publishing Corporation, Dordrecht, p. 172 (1982).

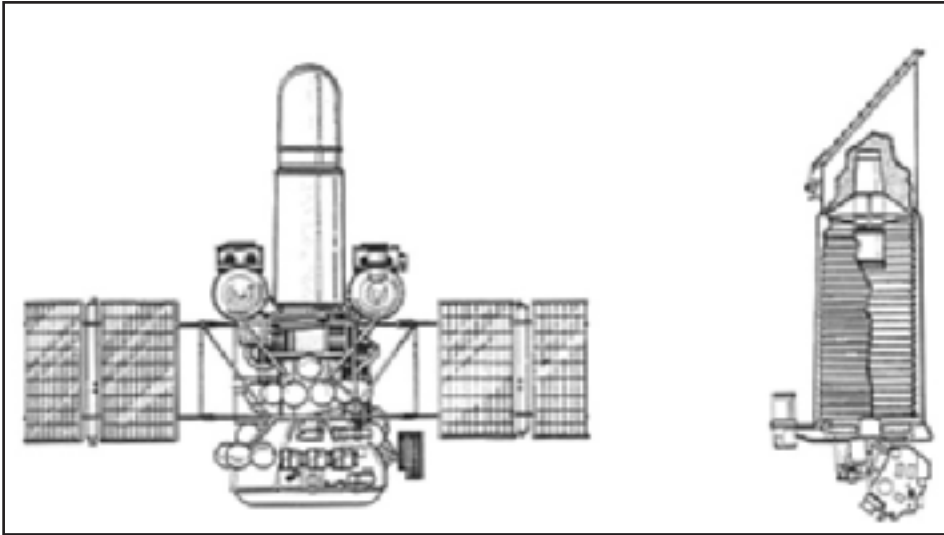


Fig. 59: Telescopio franco-soviético UV en la plataforma Astron. El segundo instrumento era SKR-02M, un espectrógrafo de rayos X.

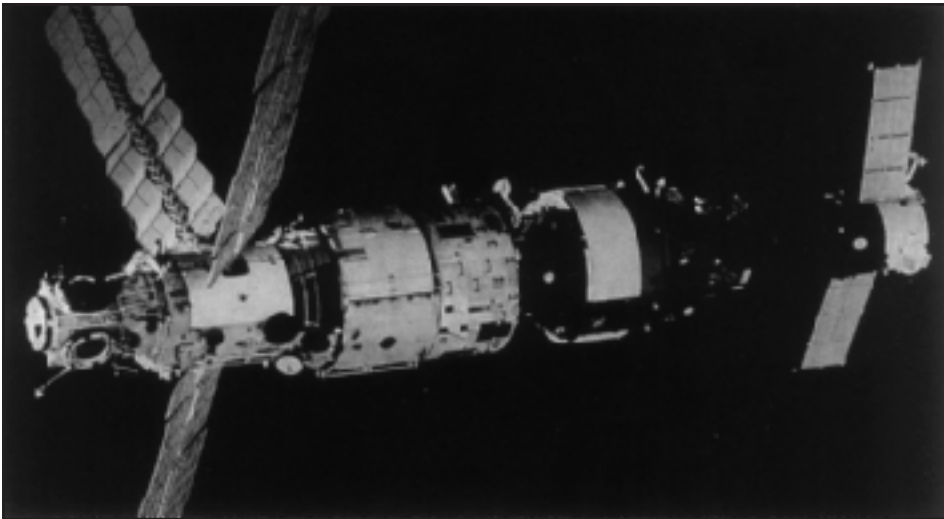


Fig. 60: La estación espacial Mir con el módulo de astrofísica Kvant, hacia el centro de la imagen.

-esquemmatizado en la figura 61- contenía un conjunto de experimentos de alta energía, que incluía los siguientes instrumentos: un detector muy sensible para rayos X duros en el rango entre 15 y 200 keV; un sistema de máscara codificada para generar imágenes X de alta energía, con fotones que no pueden ser focalizados mediante telescopios normales de rayos X (TTM/COMIS), con un campo de visión de $8^\circ \times 8^\circ$ para el rango entre 2 y 30 keV y una resolución de $2'$; un

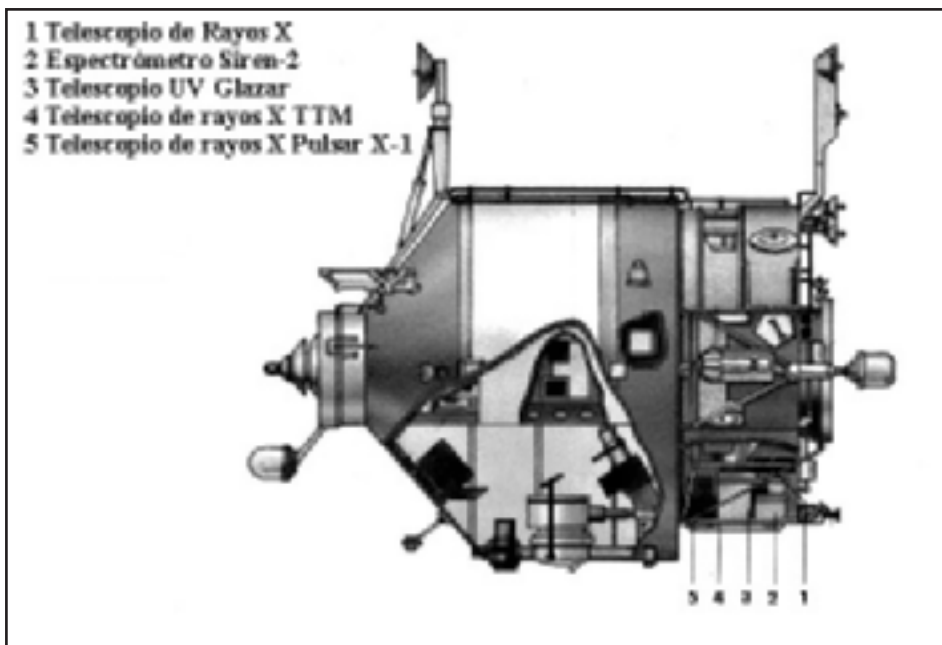
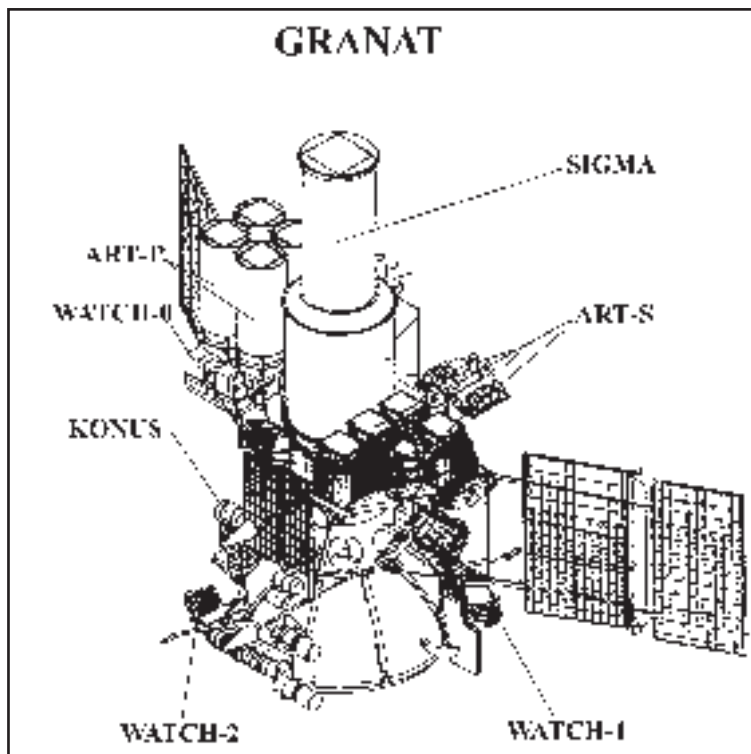


Fig. 61: Esquema del módulo de astrofísica Kvant.

contador proporcional de centelleo en gas para el rango entre 2 y 100 keV con campo de $3^\circ \times 3^\circ$, basado en el desarrollo del GSPC de la misión *Exosat*; un espectrómetro de centelleo, HEXE (*High Energy X-ray Experiment*), para el rango entre 20 y 200 keV y campo de $1^\circ,6 \times 1^\circ,6$; y PULSAR X-1, un espectrómetro para la detección de rayos X duros y gamma en el rango 50-800 keV basado en un contador de centelleo, e igualmente con campo de $3^\circ \times 3^\circ$. Esta misión fue un ejemplo de cooperación internacional con la colaboración de Alemania, el Reino Unido, Holanda y la Agencia Espacial Europea, que marcaría una forma de trabajar de los científicos rusos en el futuro. Los instrumentos, todavía en funcionamiento, han contribuido de forma muy importante al estudio de objetos compactos, especialmente en la detección de posibles agujeros negros y la investigación del centro de nuestra galaxia.

La misión *Phobos* tenía como objeto el estudio del satélite marciano homónimo. *Phobos-1* fue lanzado el 7 de agosto de 1988 desde Baikonur. Entre los 25 instrumentos que portaban, el RF-15 era un espectrómetro de rayos X. Se perdió en septiembre de 1988, de camino al planeta rojo. Por su parte, *Phobos-2*, lanzado cinco días más tarde también contenía instrumentación, pero también fue perdido en las maniobras de aproximación al mayor satélite de Marte. Una de las dos naves se muestra en la figura 62.

Fig. 63: Configuración del Observatorio Soviético Granat y su carga útil: el telescopio francés de rayos gamma SIGMA, los instrumentos rusos ART-P y ART-S, KONUS y PHEBUS, y el monitor danés de todo el cielo X WATCH. Comparar con Astron (figura 57).



obtener imágenes con $13'$ de resolución. El detector estaba rodeado por un sistema protector de veto para reducir el ruido de las medidas, y otro de anticoincidencia para rechazar datos espúreos. Por otro lado, cuatro instrumentos proporcionados por Dinamarca, constituían el llamado experimento WATCH (*Wide Angle Telescope for Cosmic Hard x-rays*), cubriendo el rango 8-80 keV (figura 64). Los tres de los cuatro instrumentos operativos tras el lanzamiento, proporcionaron un monitoreo continuo de casi todo el cielo, lo que permitía la localización de fuentes persistentes y transitorias de rayos con una precisión de 1° . La técnica que utilizaba WATCH tiene su punto de partida en la técnica RMC (*Rotation Modulator Collimator*), desarrollada por el norteamericano Lawrence Mertz en 1968 y aplicada inicialmente por su compatriota Herbert Schnopper y colaboradores en 1969. Más tarde (1981), esta técnica sería refinada por el danés Niels Lund. Básicamente, consiste en situar delante del detector (un centellador con barras alternadas de NaI y CsI) una rejilla que impide el paso de la radiación X de las fuentes. Al ir esta rejilla girando a una frecuencia angular constante, el flujo de la fuente (o fuentes) en cuestión va a quedar modulado de una manera unívoca para cada fuente del campo, por lo que es posible determinar la posición de los objetos de una manera inmediata. Por último, la carga útil de *Granat* se completaba con dos monitores para detección de explosiones de rayos gamma de distinta energía (PHEBUS y KONUS).

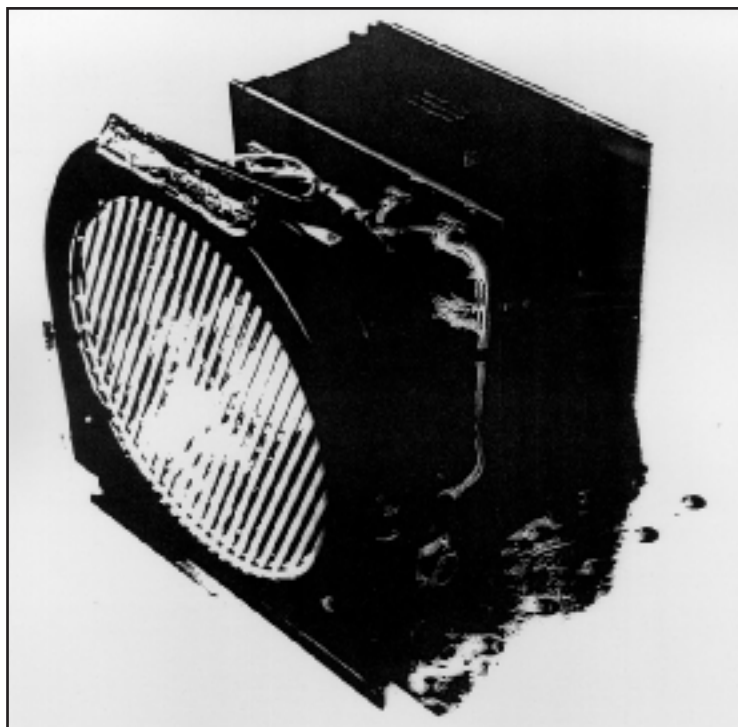


Fig. 64: Detalle de uno de los monitores del experimento WATCH, antes de ser instalado en Granat.

La misión *Granat* ha permitido durante 1990-97 realizar mapas detallados de la emisión de alta energía procedente del centro de nuestra galaxia, y detectar la fuerte variabilidad de las fuentes observadas en esta región. En particular se ha comprobado que la fuente, descubierta por el satélite *Einstein* y bautizada como 1E1740.7-2942, seguramente se encuentra a unos 45' del centro galáctico en contra de las ideas iniciales acerca de su coincidencia con él. Dicha fuente se ha hecho famosa por presentar una línea intensa de emisión a 511 keV (rayos gamma) que se corresponde probablemente con la aniquilación de electrones con positrones. Por su parte, los daneses Niels Lund y Søren Brandt descubrieron con WATCH la fuente de rayos X Nova Muscae 1991, horas antes de que lo hiciera el satélite *Ginga*. El espectro de esta nova es similar al de la fuente con un supuesto agujero negro A0620-00 y según medidas de *Granat*, podría haber emitido también una línea de emisión intensa en 511 keV durante un breve intervalo de tiempo. Probablemente los resultados más importantes hayan sido el catálogo de explosiones de rayos gamma que observadas en el rango de los X duros fue confeccionada por WATCH, y el descubrimiento el 15 de agosto de 1992 de la extraordinaria fuente GRS 1915+105, única en la Galaxia. En la figura 65 presentamos una imagen del satélite *Granat* antes de ser lanzado al espacio.

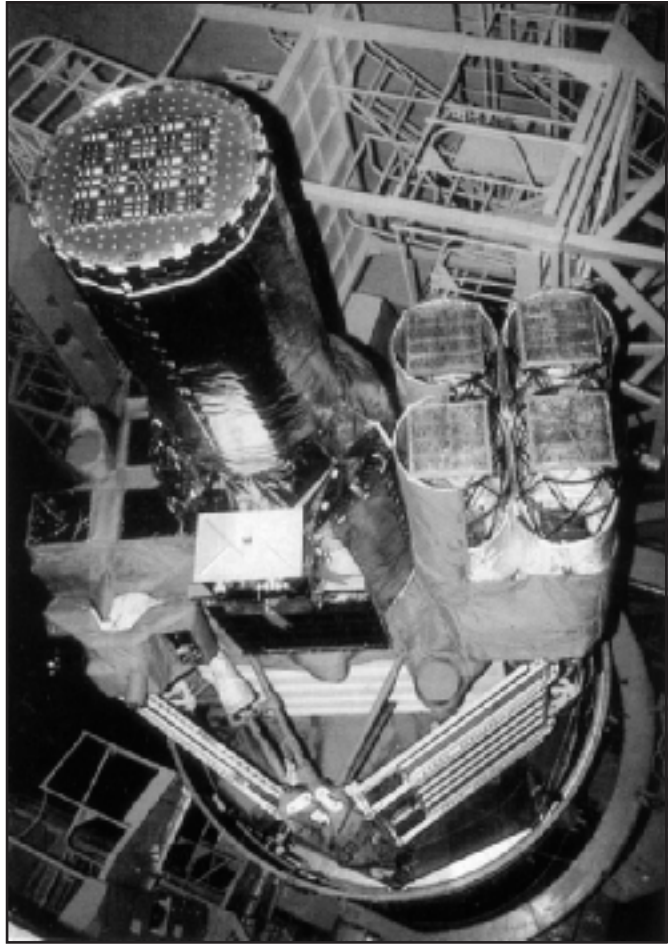


Fig. 65: El Observatorio Granat antes de ser lanzado al espacio.

3.5. ¿Cómo obtener imágenes en rayos X para energías altas?

Como ya hemos comentado anteriormente, los sistemas ópticos de incidencia rasante sólo funcionan para fotones con energías por debajo de aproximadamente 10 keV. A energías más altas, el ángulo máximo de incidencia es tan pequeño que el área colectora efectiva de los telescopios es despreciable a menos que se fabriquen estructuras enormes, difíciles de instalar en órbita. Por supuesto podemos hacer imágenes mediante técnicas de sintetización, es decir, barriendo con un detector colimado la zona del cielo que queremos estudiar y reconstruyendo posteriormente la imagen, combinando mediante ordenador las medidas obtenidas en las diferentes posiciones. Esto es poco eficaz por el tiempo de observación que es necesario y por la variabilidad que sabemos que presentan la mayor parte de las fuentes de rayos X. Para poder construir imágenes en el rango de los rayos X duros se utilizan generalmente estructuras con máscaras codificadas, a las que ya

nos hemos referido al hablar de los instrumentos a bordo de algunos observatorios espaciales, principalmente, *Granat*.

Un telescopio de máscara codificada funciona de forma parecida a las cámaras con un pequeño agujero o diafragma (*pinhole* en inglés). Los fotones pasan a través de los agujeros hechos en la máscara y son registrados por el detector. En las cámaras de diafragma, dada la distancia entre el agujero y el detector, la identificación de la posición en la que incide el fotón energético sobre éste último permite deducir cierta información acerca de las diferentes zonas del objeto observado. Desde el punto de vista de los rayos X, en 1960 Friedman utilizó con éxito una cámara de este tipo (que parecía una especie de caja de zapatos con un agujero) a bordo de un cohete de sondeo para obtener la primera imagen del Sol en rayos X. Estas cámaras pueden considerarse como las de máscara codificada donde la máscara sólo tiene un agujero y produce una única imagen. Una cámara con dos agujeros producirá dos imágenes que se solapan y otra con tres agujeros, tres imágenes. Esto puede parecer totalmente inútil en imágenes visibles pero en el campo de los rayos X, los contadores proporcionales sensibles a la posición pueden medir el instante de llegada y la localización de los fotones individuales que inciden en el detector. Por ello es posible decodificar la imagen múltiple compleja que se genera con la máscara codificada mediante un tratamiento de la información por ordenador. Es por ello por lo que el norteamericano R. H. Dicke introdujo el concepto de máscara codificada en 1968. La ventaja de utilizar una máscara con muchos agujeros (hasta un 50% del total) es que se pueden detectar más fotones en un instante dado, lo que generalmente se llama técnica de multiplexado. Un telescopio de máscara codificada utiliza una distribución compleja de los agujeros, que forman un diagrama de sombra específico sin relación alguna con el objeto que se observa. Utilizando la posición y el tiempo de llegada de los fotones individuales al detector, junto con el apuntado del telescopio y las características de distribución de agujeros de la máscara codificada, se puede reconstruir la imagen original de la fuente de rayos X. Si ésta es puntual, la imagen formada será lógicamente la sombra de la máscara, pero si hay más de una fuente visible en el campo de visión, cada una producirá su propia sombra y el resultado es una imagen más compleja que es preciso deconvolucionar. La resolución espacial depende del tamaño de los agujeros de la máscara, la distancia entre ésta, y el detector y la resolución espacial del propio contador proporcional.

Para minimizar el procesamiento de datos necesario, la distribución de los agujeros de la máscara codificada se diseña de forma que sea fácil encontrar la sombra producida, incluso si se producen varias proyecciones simultáneas sobre sí misma. Además, debe ser posible encontrar la forma de las sombras incluso en presencia de ruido de fondo del detector. Una distribución regular es por esta razón poco recomendable ya que daría la misma sombra en muchas posiciones. Para obtener los mejores resultados, se necesita una distribución generada mediante estructu-

ras cíclicas bidimensionales, conocidas con el nombre de pseudoaleatorias. En la figura 66 mostramos cómo los fotones de dos fuentes de rayos X separadas entre sí, dentro del campo de visión de un detector con máscara codificada, generan una imagen en el detector, a partir de la cuál se puede deducir la posición de cada una de las fuentes individuales.

El principio de las máscaras codificadas, que se emplean sobre todo en los telescopios de rayos gamma, se probó por primera vez con un pequeño experimento lanzado en un cohete de sondeo *Skylark* en 1976. El cohete midió durante

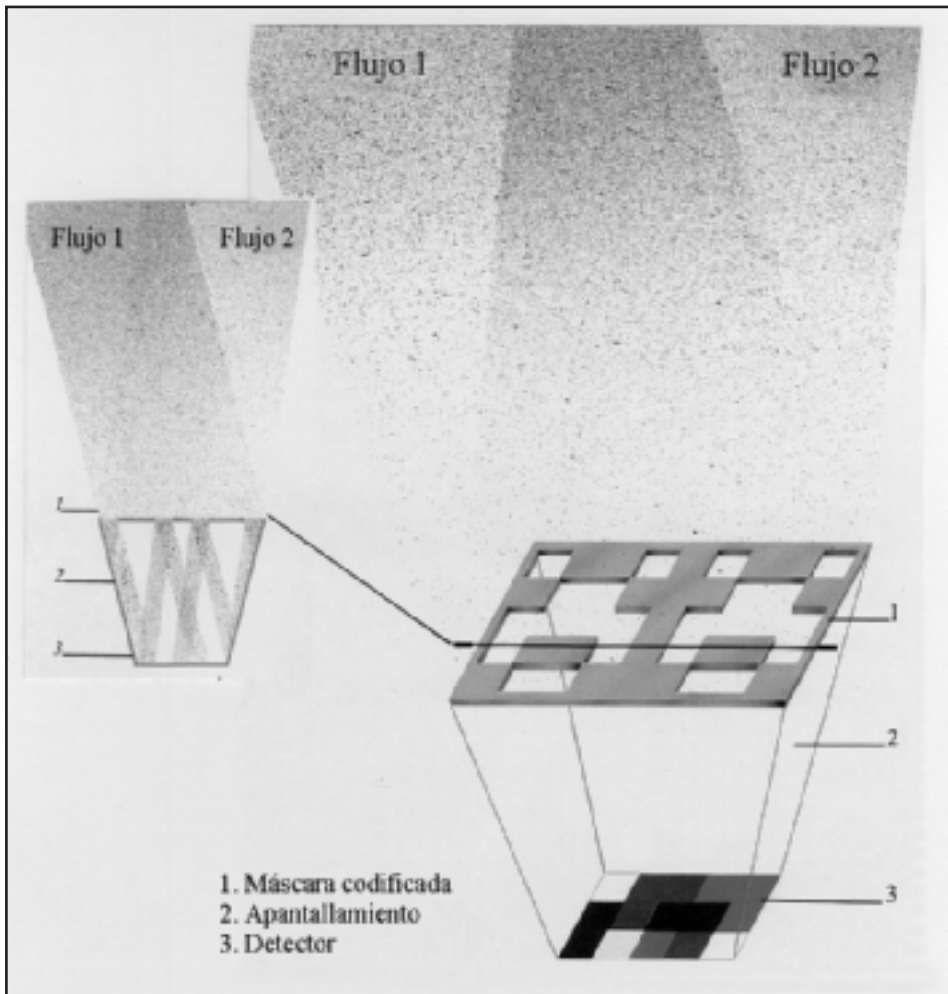
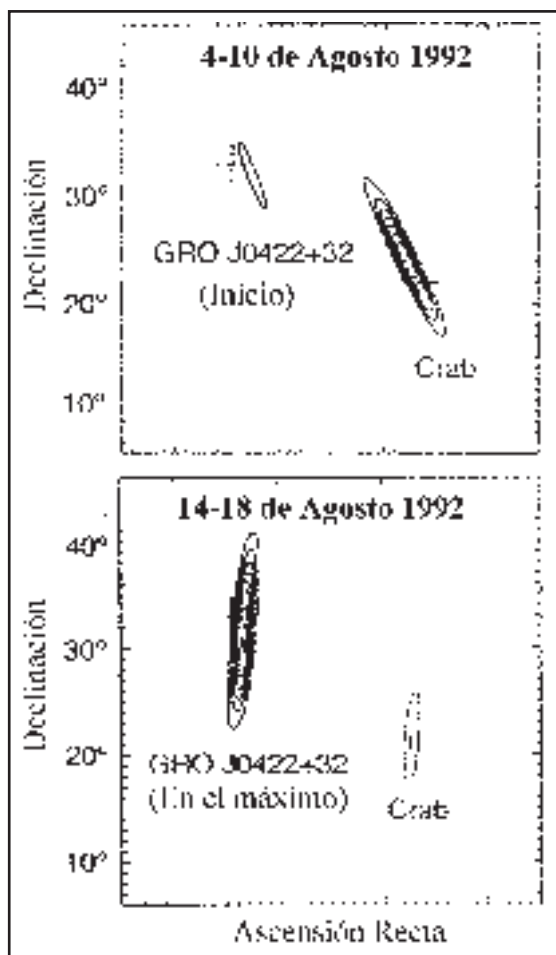


Fig. 66: Funcionamiento de una máscara codificada para la reconstrucción de imágenes en un detector de rayos X sensible a la posición. La sombra de la fuente 1 producida por la máscara en el detector se resalta en un tono y la de la fuente 2 en otro, indicándose en negro las zonas a las que contribuyen ambas fuentes. En el diagrama lateral se indica la trayectoria de los fotones.

sólo 6 minutos, tiempo suficiente para obtener una imagen del centro de la Galaxia en rayos X duros. Con este experimento se descubrió la existencia de una serie de fuentes de alta energía alrededor del núcleo de nuestra galaxia, y empezó una intensa búsqueda que está precisamente en su apogeo en la actualidad. El éxito de la misión permitió volar un nuevo detector con máscara codificada a bordo del programa *Spacelab-2* entre julio y agosto de 1985, colocado en órbita con la lanzadera espacial, que incluían dos telescopios coalineados con un sistema de apuntamiento altazimutal. Cada telescopio tenía una máscara codificada, en la que los elementos opacos cubrían la mitad de la máscara, colocada a tres metros de distancia del detector, que era un contador proporcional sensible a la posición. Las máscaras de cada telescopio diferían en el tamaño de los agujeros y, por tanto, en la resolución angular que era de 3' y 12' respectivamente. A cambio de la resolución espacial se obtiene una mayor sensibilidad. El campo de visión de cada telescopio era de unos 6° de ancho. Además, sistemas ópticos alineados permitían obtener imágenes del mismo campo de visión para facilitar la reconstrucción de la imagen X. El experimento resultó nuevamente un éxito y se pudieron observar cúmulos de galaxias, el centro de nuestra galaxia y el resto de supernova del Velo en unas 75 horas útiles de observación que pudieron llevarse a cabo. Igual que la misión *Skylab* había permitido en 1973 probar la tecnología para construir telescopios de rayos X de baja energía, la estación *Spacelab*, en 1985, hizo lo propio con los telescopios de alta energía mediante máscaras codificadas.

Otra técnica, en el caso de que no se disponga de una máscara codificada, consiste en utilizar a la misma Tierra, de manera semejante a la ya mencionada en el caso de la fuente Tau X-1 tras ser ocultada por la Luna en 1964, comprobando su asociación con el residuo de supernova del año 1054. Ésta es la técnica que utiliza el experimento BATSE en el Observatorio Compton de rayos gamma. El experimento sólo utiliza centelladores de yoduro de cesio de 50 cm de diámetro sin colimación ni máscara codificada alguna. El mapa del cielo en rayos X se va obteniendo conforme el limbo de la tierra deja ver por un lado, y ocultando por el otro, sucesivas regiones de la esfera celeste conforme el satélite se desplaza en su baja órbita (550 km y 1,5 horas de periodo) alrededor de la Tierra. A esta distancia, nuestro planeta oculta casi el 45% del cielo. Así la ocultación de una fuente (16 veces al día) tras el limbo terrestre, producirá una disminución del número de fotones de rayos X recibidos, tanto más cuanto más brillante sea el objeto. Y ocurrirá al revés cuando el objeto emerge tras el limbo opuesto. A lo largo de los años pueden ser realizados estudios de variabilidad. Además -y esto es muy importante para el caso de fuentes nuevas-, con el paso de los días, y debido a la traslación de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, será posible refinar la posición del nuevo objeto si éste perdura lo suficiente. Un ejemplo de este tipo de técnica, desarrollada por Shuang Zhang y colaboradores, se representa en la figura 67, que muestra como se descubrió el candidato a agujero negro GRO J0422+32 en agosto de 1992.

Fig. 67: El descubrimiento de GRO J0422+32/ Nova Persei 1992 por BATSE en CGRO. Las curvas representan líneas de intensidad constante. La apariencia alargada de los objetos fuentes es sólo un efecto instrumental debido a la ubicación de los objetos con respecto al limbo terrestre. El instrumento como tal se muestra en la figura 73.



3.6. El comienzo de los años noventa: de *Rosat* a *Asca*.

El éxito de misiones como *Einstein*, con espejos de rayos X capaces de producir imágenes de alta resolución, aumentó el interés por continuar los trabajos en esta dirección. Sin embargo, los satélites pequeños no podían transportar equipos tan grandes y pesados y había que volver a misiones relativamente complejas, aunque la tecnología desarrollada en la década de los ochenta permitía reducir enormemente los subsistemas de servicio del satélite y los equipos de control de los instrumentos. Así se diseñó la siguiente misión, que podemos considerar de tamaño mediano, con el nombre de *Rosat* (*Röntgen Satellite*), en conmemoración del descubridor de los rayos X. La misión, que fue lanzada el 1 de junio de 1990, era el fruto de una cooperación entre Alemania (principal contribuyente), Estados Unidos y el Reino Unido. *Rosat* lleva a bordo dos sistemas de telescopios diferentes: un gran

telescopio de rayos X y un telescopio más pequeño para la medida de radiación en el rango ultravioleta extremo. En la figura 68 mostramos un diagrama con la estructura del satélite.

El telescopio de rayos X está formado por cuatro espejos anidados de incidencia rasante del tipo Wolter 1, con segmentos paraboloide e hiperboloide, y permite una resolución espacial sobre el eje óptico de unos 4". El tamaño del telescopio es de 84 cm de apertura y la distancia focal de 2,4 metros. En el plano focal se instalaron tres instrumentos: dos contadores proporcionales sensibles a la posición (PSPC) y una copia de la cámara para imágenes del satélite americano *Einstein* (también llamada HRI), aunque con un fotocátodo más eficiente de yoduro de cesio. La resolución angular con los PSPC es de unos 30" en un campo de visión de 2° y con HRI del orden de 4" en un campo de visión de 35' de diámetro. Naturalmente, los detectores PSPC, con una mayor área efectiva, son más sensibles que el HRI a flujos de radiación débiles a cambio de la menor resolución espacial. El rango de energías en que operan los instrumentos va de 0,1 a 2,4 keV. En comparación con *Einstein*, se incrementó el área efectiva y por

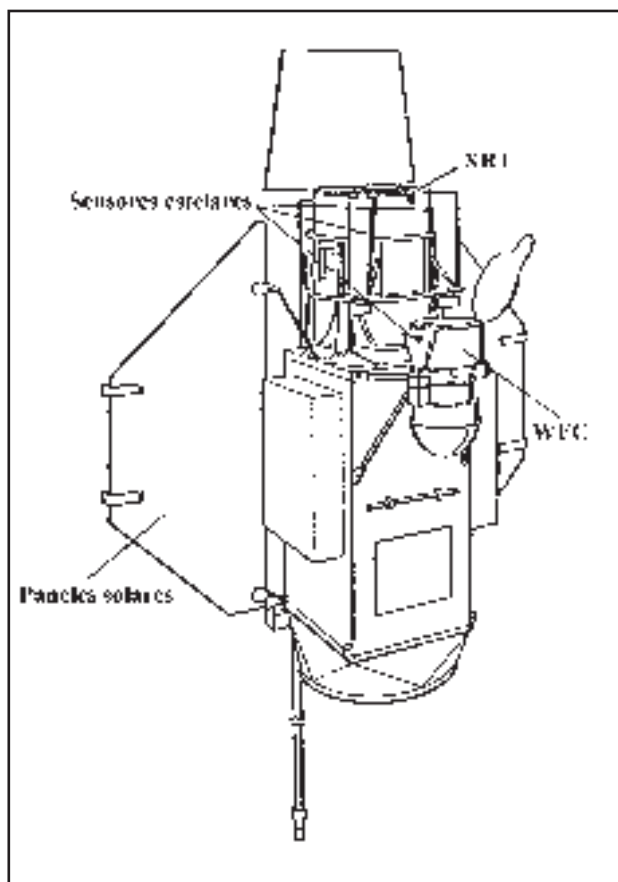


Fig. 68: Esquema del satélite Rosat.

tanto la sensibilidad, así como el campo de visión, sacrificando la respuesta a energías más altas. Por otro lado, con *Rosat* se obtiene una mayor concentración de la energía procedente de fuentes puntuales, mejorando la respuesta de los instrumentos. El ruido de fondo se reduce mediante un sistema electrónico de veto, que permite rechazar hasta el 99,5% de las cuentas de fotones X no cósmicos. En la figura 69 se muestra un dibujo del satélite *Rosat* en su configuración en órbita alrededor de la Tierra.

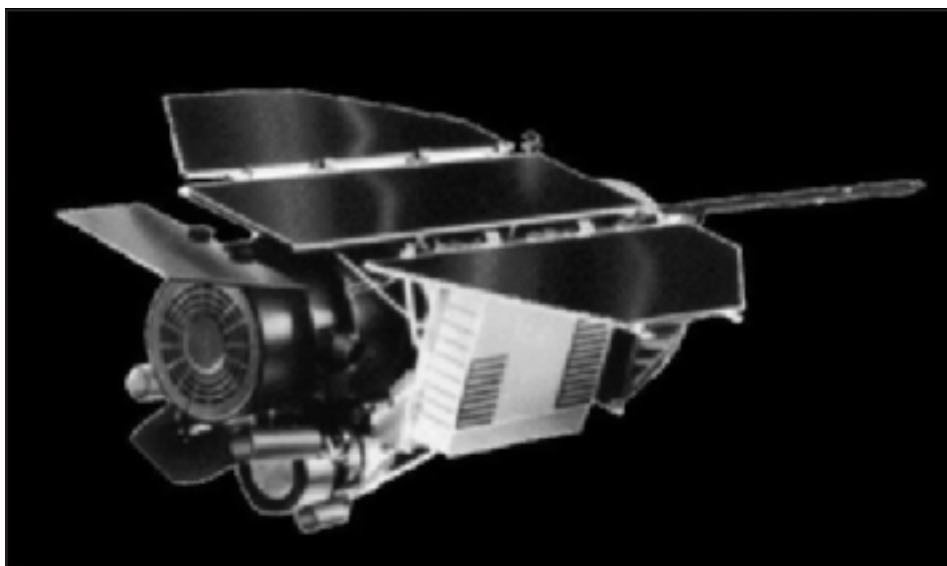


Fig. 69: Concepto del satélite *Rosat* en órbita.

El primer objetivo de la misión *Rosat*, tanto en el rango de los rayos X como en el nuevo campo del ultravioleta extremo, era hacer un rastreo completo del cielo a la búsqueda de nuevas fuentes, algo que no se llevaba a cabo de forma sistemática desde la misión norteamericana *HEAO 1*, hacía ya muchos años. Con este fin se dedicaron seis meses de observaciones con los contadores proporcionales tipo PSPC. En esta fase, que terminó en febrero de 1991, se detectaron del orden de 77.000 fuentes, lo que incrementa considerablemente cualquiera de los catálogos anteriores (ver figura 70 y lámina 13). Este nuevo catálogo de fuentes observadas en el rango de los rayos X blandos, llamados RASS, fue además complementado por un rastreo del cielo en el rango ultravioleta extremo mediante la cámara de campo amplio, WFC, embarcada con este propósito. Durante la fase de observación de objetos seleccionados, en la que aún se encuentra operando como un observatorio abierto a las peticiones de tiempo de la comunidad científica, ya se han hecho numerosas aportaciones relevantes, algunas de las cuales mencionamos en los capítulos IV y V. Un ejemplo, aunque negativo, fue la imposibilidad de detectar la emisión de

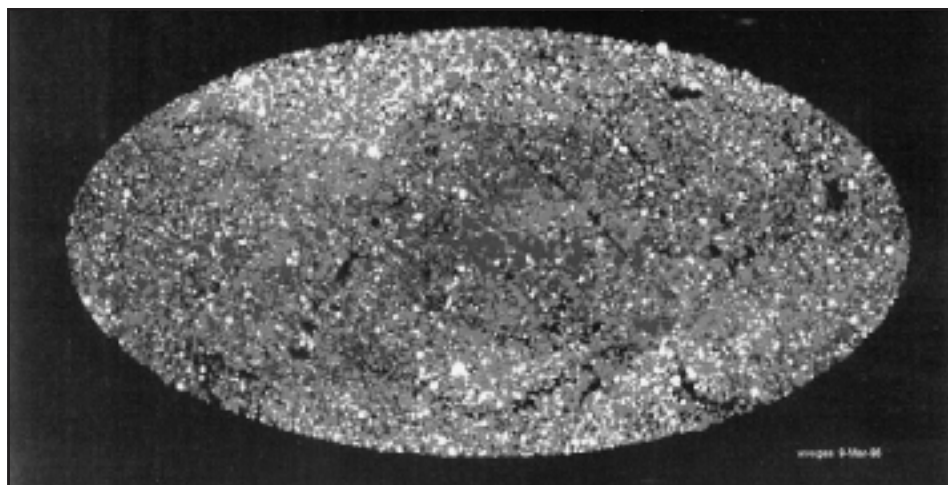


Fig. 70: Distribución, en coordenadas galácticas de 77.549 fuentes de rayos X blandos detectadas por el satélite Rosat, en el «ROSAT All-Sky Survey» (RASS).

rayos X de la supernova SN1987A, a los cuatro años de su explosión, a pesar de que *Ginga* lo había hecho a los pocos meses. Esto nos indica la existencia de una materia absorbente alrededor de la supernova similar a la que nos impide ver rayos X procedentes del centro de la galaxia, más evidente para energías bajas que para los fotones duros. El menor ruido intrínseco y la alta sensibilidad, de 3 a 6 veces mejor que el IPC del *Einstein* en el rango de energía por debajo de 2 keV, han convertido a *Rosat* en la misión más importante hasta hoy para la investigación de rayos X blandos. De hecho, es lo que ha posibilitado el descubrimiento de 15 de las ya mencionadas fuentes «supersuaves» en la galaxia M31.

También hemos de reseñar en este momento a *Ulysses*, una misión conjunta ESA-NASA para explorar el Sol y cercanías a altas latitudes, por encima de los polos solares. Fue lanzada el 6 de octubre de 1990. Entre sus numerosos experimentos, es de nuestro interés el dedicado a la observación de flares solares y de origen cósmico (tanto en X como en gamma), con centelladores de yoduro de cesio (15-150 keV) y detectores de silicio (5-20 keV).

Mientras tanto, los norteamericanos continuaron aprovechando la existencia de plataformas de uso general, puestas en órbita con la lanzadera espacial, para instalar instrumentos de rayos X y ensayar nuevas tecnologías. Una de estas misiones lanzadas al espacio por la NASA para la observación de la emisión de rayos X del Universo, ha sido *Astro-1* (ver figura 71). Del 2 al 11 de diciembre de 1990 se colocó en órbita esta plataforma, a bordo de la lanzadera espacial *Columbia*, con cuatro instrumentos que operaban en diferentes longitudes de onda. El experimento BBXRT (*Broad-Band X-ray Telescope*) estaba dedicado a la observación de rayos X y consistía en dos sistemas de telescopios idénticos de rayos X diseñados para el rango de energías entre 0,3 y 12 keV, es decir, hasta valores más altos que los medidos con *Rosat* o con *Einstein*, aunque con una resolución espacial bastante

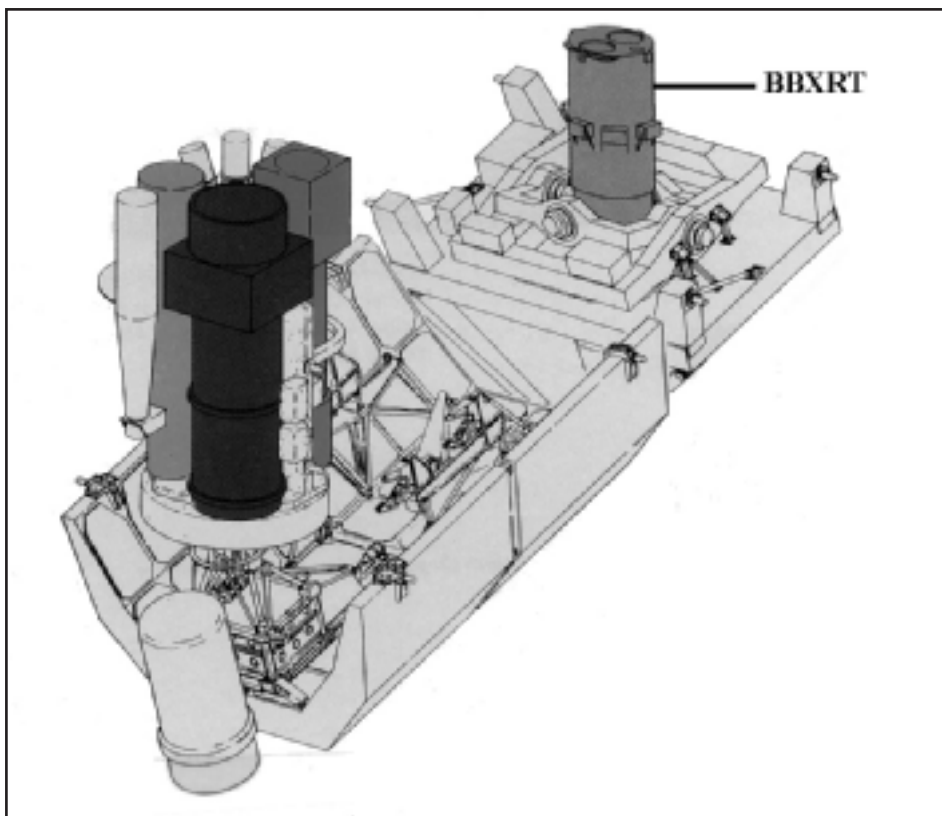


Fig. 71: Esquema del Observatorio Norteamericano Astro, para ser instalado a bordo de la lanzadera espacial. El instrumento BBXRT se encuentra al fondo.

más modesta, entre 2' y 6'. Para obtener estas características, los telescopios de rayos X utilizaban una nueva técnica basada en la construcción de una serie de espejos anidados de incidencia rasante mediante superficies reflectoras cónicas que se aproximan a los espejos ideales con superficies paraboloides e hiperboloides, es decir un diseño Wolter 1 modificado. Esto simplifica enormemente la fabricación de los espejos y, al ir las superficies reflectoras de oro sobre láminas delgadas de aluminio en lugar de gruesas estructuras de vidrio indeformable, se pueden colocar muchos más espejos (uno dentro de otro) sobre el mismo eje óptico. De esta forma se consiguen áreas colectoras mucho mayores y, además, como se pueden colocar espejos más cerca del eje óptico se pueden alcanzar energías más altas. Estos logros obviamente se obtienen a costa de una degradación significativa de la resolución espacial de los telescopios.

BBXRT disponía de estos innovadores telescopios de rayos X y, en el plano focal (ver esquema de la figura 72) se instaló un detector de silicio, con impurezas de litio, de cinco elementos que proporcionaba una excelente resolución espectral, cercana a los 100 eV. El elemento central del detector tenía 4' de diámetro y

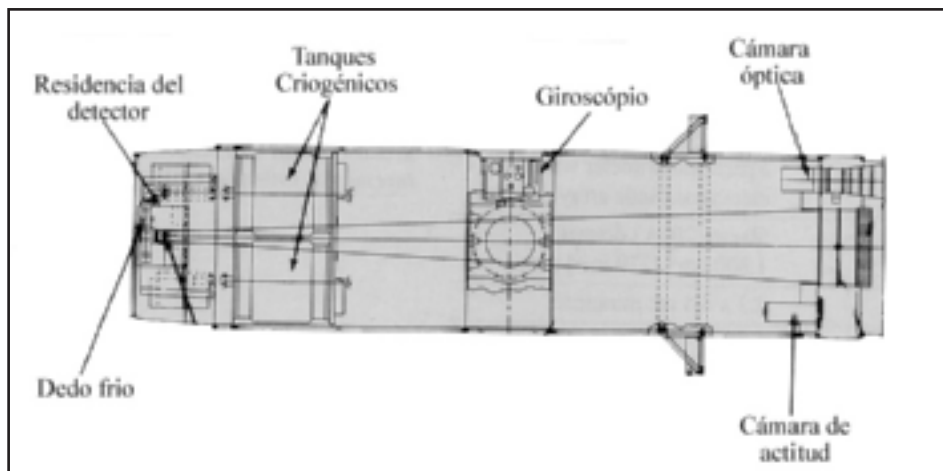
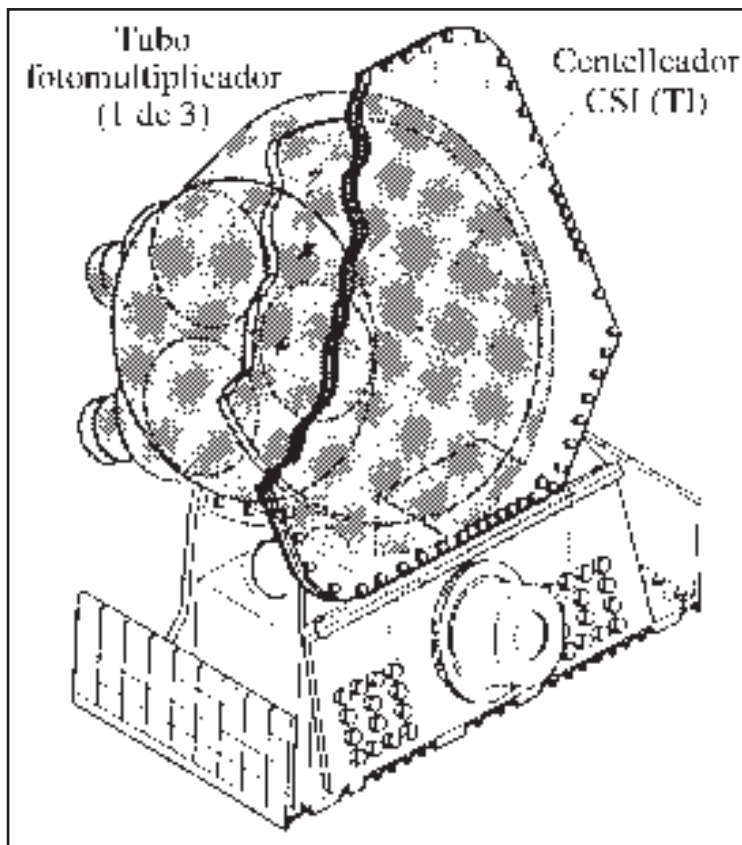


Fig. 72: Esquema del telescopio de rayos X BBXRT a bordo de Astro.

el campo de visión era de $17'$. A pesar de una serie de problemas iniciales de la misión *Astro-1* y en particular del experimento BBXRT, se obtuvieron espectros de alta calidad de 82 fuentes, tanto galácticas como extragalácticas, a lo largo de la vida operativa de la misión que duró solo ocho días.

La última misión, de la que ya se ha hablado algo anteriormente ha sido el *Observatorio Compton de rayos gamma (Compton GRO)*, un gigantesco satélite de 15.900 kg lanzado al espacio el 5 de abril de 1991 por el transbordador espacial *Atlantis*. Constituyó el segundo de la serie de Grandes Observatorios de la Nasa después del *Telescopio Espacial Hubble* (1990) y al que sigue el Observatorio de rayos X *AXAF* en 1998 (del que se habla en el capítulo VI). El *CGRO*, y como su nombre indica, se dedica al estudio de fotones más energéticos pero uno de sus instrumentos, BATSE, alcanza a ver fotones de sólo 15 keV (su rango es 15-15.000 keV). El experimento estaba originariamente diseñado para el estudio de las explosiones cósmicas de rayos gamma (descubiertas por las *Vela*) y sólo utiliza 8 centelladores de yoduro de cesio de 50 cm de diámetro y 1,25 cm de espesor sin colimación ni máscara codificada alguna. Los 8 detectores (figura 73) están dispuestos en las caras de un hipotético octaedro regular de forma que cualquier punto de la bóveda celeste puede ser observado por 4 detectores. Aunque en principio la capacidad de imagen pudiera parecernos totalmente nula, ya hemos comentado que el mapa del cielo en rayos X duros se va obteniendo conforme el limbo de la tierra deja ver por un lado, y ocultando por el otro, sucesivas regiones de la esfera celeste conforme el satélite se desplaza en su baja órbita (450 km de altura y 1,5 horas de periodo) alrededor de la Tierra. De este modo y aparte de poder observar los objetos más brillantes del cielo de rayos X duros, se han podido descubrir nuevas fuentes y púlsares de rayos X (éstos últimos gracias a la gran área colectora de los detectores).

Fig. 73: Esquema de uno de los ocho detectores de BATSE situados en el CGRO.



Por otro lado, en su pertinaz y sistemática investigación del Universo en rayos X mediante misiones de pequeño tamaño, los japoneses pusieron en órbita en 1991 la misión *Solar-A*, posteriormente llamada *Yohkoh*, para la investigación del Sol en su faceta más activa. A bordo de este satélite, cuya configuración mostramos en la figura 74, se acomodaron un telescopio de rayos X para bajas energías con un detector CCD (SXT) y una cámara para imágenes de rayos X duros (HXT). Estos instrumentos envían datos de excepcional calidad del Sol en rayos X con una resolución temporal que llega a ser de 2 segundos durante erupciones y una resolución espacial de hasta 3". Los resultados proporcionados pueden verse en la figura 75 en la que se combinan las imágenes obtenidas con el telescopio de rayos X blandos y la cámara de rayos X duros.

Entretanto, también tuvo lugar el lanzamiento del satélite *Eureca* (*European Retrievable Carrier*) de la Agencia Espacial Europea (figura 76), a bordo del transbordador espacial *Atlantis*, el 31 de julio de 1992. Entre sus experimentos, figuraba una de las unidades de WATCH, versión ligeramente modificada de los detectores homónimos que volaron en *Granat*. Produjo interesantes resultados hasta el final de la misión, el 1 de julio de 1993.

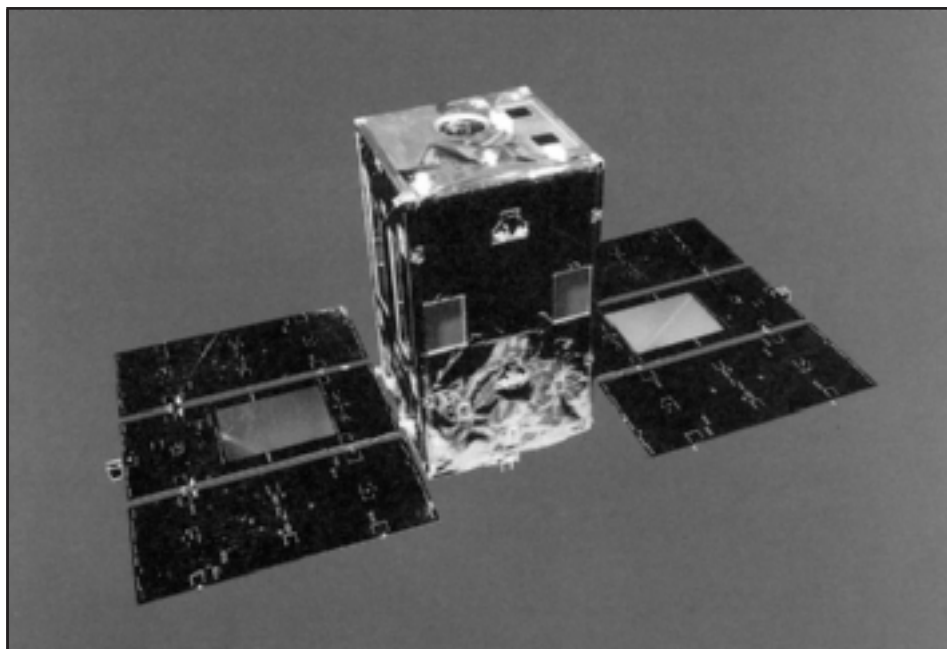


Fig. 74: El satélite japonés Solar-A. (Yohkoh)

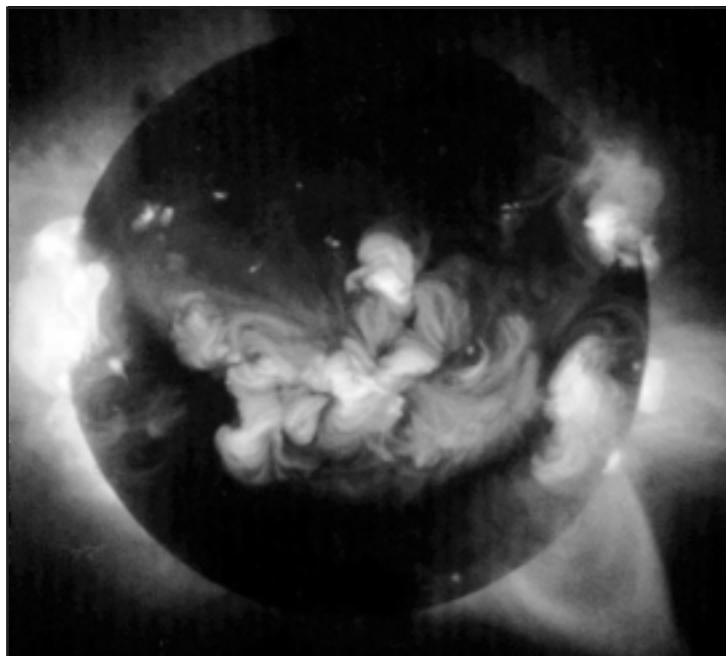


Fig. 75: Imagen del Sol en rayos X blandos, tomada por el SXT del satélite Yohkoh, con indicación de la medida de una erupción en rayos X duros obtenida con el instrumento HXT.



Fig. 74: Eureka momentos antes de ser puesto en órbita por el brazo desplegable del transbordador espacial Atlantis.

También por entonces tuvo lugar la observación con el instrumento DXS (*Diffuse X-ray Spectrometer*) en el transbordador *Endeavour*, durante el vuelo de enero de 1993. Tenía dos espectrómetros con cristales de Bragg (0,15-0,28 keV) y resolución de 10 eV, para medir el fondo de radiación en escalas angulares de 15° .

La utilización de cámaras CCD en los detectores de rayos X y el empleo de espejos fabricados mediante aproximación cónica, son los avances tecnológicos más importantes aportados por estos dos últimos satélites y se incorporaron a la última de las misiones lanzadas al espacio para el estudio del Universo en rayos X.

El siguiente satélite japonés de rayos X, todavía más ambicioso que *Ginga*, y con el nombre de *Asca* (*Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics*, anteriormente *Astro-D*), fue lanzado al espacio el 20 de febrero de 1993. Este nuevo observatorio representó un importante avance tecnológico. El satélite era de mayor tamaño que cualquiera de los anteriores lanzados por Japón, con un diámetro de 1,3 metros y una longitud de 4,7 metros (ver el esquema de la figura 77), incorporando cuatro telescopios de rayos X basados en el sistema de aproximación cónica sobre

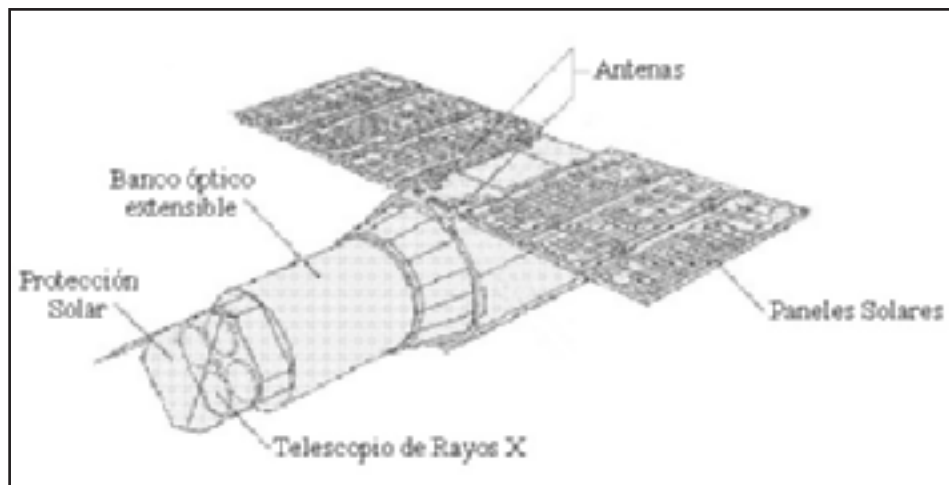


Fig. 77: Esquema del satélite japonés Astro-D. (Asca)

láminas delgadas, similar al experimentado en el telescopio estadounidense *BBXRT*. De esta forma, era posible cubrir un rango de energías más amplios que en misiones anteriores, entre 0,5 y 10 keV, a la vez que se consigue una gran área efectiva. Los instrumentos instalados en el plano focal eran dos sistemas para la obtención de imágenes sobre detectores CCD y dos contadores proporcionales sensibles a la posición, que permiten medir fuentes de rayos X hasta un orden de magnitud más débiles que las detectadas con el satélite *Ginga*. Dos de los detectores utilizan cámaras CCD de 420 x 420 píxeles (SIS, *Solid-state Imaging Spectrometer*) que abarcan un campo de visión de 20' x 20', y los otros dos se basan en centelladores de gas (GIS, *Gas Imaging Spectrometer*) que al igual que SIS posibilitan tanto la espectroscopía como la imagen (el campo de GIS es de 50' de diámetro). La gran ventaja del GIS sobre los contadores proporcionales clásicos es que su resolución espectral es 2,5 veces mejor. El objetivo principal de *Asca* era la obtención de nuevos y mejores datos en el rango X de diferentes fuentes a través de espectros. En realidad, es el primer paso de los científicos japoneses en la dirección hacia el campo de los grandes observatorios abandonando algunos de los conceptos de misión pequeña mantenidos hasta ahora por ISAS.

Entre los descubrimientos más importantes de *Asca* se sitúa el realizado en 1993 por el grupo de Toshio Murakami, cuando se observó una explosión X (de duración inferior a 0,5 s) simultáneamente a una explosión gamma (de 28 ms de duración) proveniente de la fuente repetitiva de rayos gamma suaves SGR 1806-20, lo que ha permitido determinar su posición con un error de 1' reforzando la hipótesis de que este tipo de objetos (de los cuales se conocen sólo tres) están asociados con restos de supernova. No menos importante fue el descubrimiento por parte de Yashuo Tanaka y su grupo en 1994 del desplazamiento gravitacional observado en la línea K_{α} del hierro en la galaxia MGC-6-30-15. Las características de esta

línea de emisión refuerzan la idea de que agujeros negros muy masivos ocupan las regiones centrales en muchos núcleos galácticos activos.

Actualmente (1998) se encuentra ya en fase avanzada la misión *Astro-E*, demostrando la intención de ISAS de perseverar en este tipo de estudios. En el capítulo VI comentaremos con más detalle las nuevas tecnologías incorporadas en las tres últimas misiones mencionadas, *BBXRT*, *Solar-A* y *Asca*, y que cierran

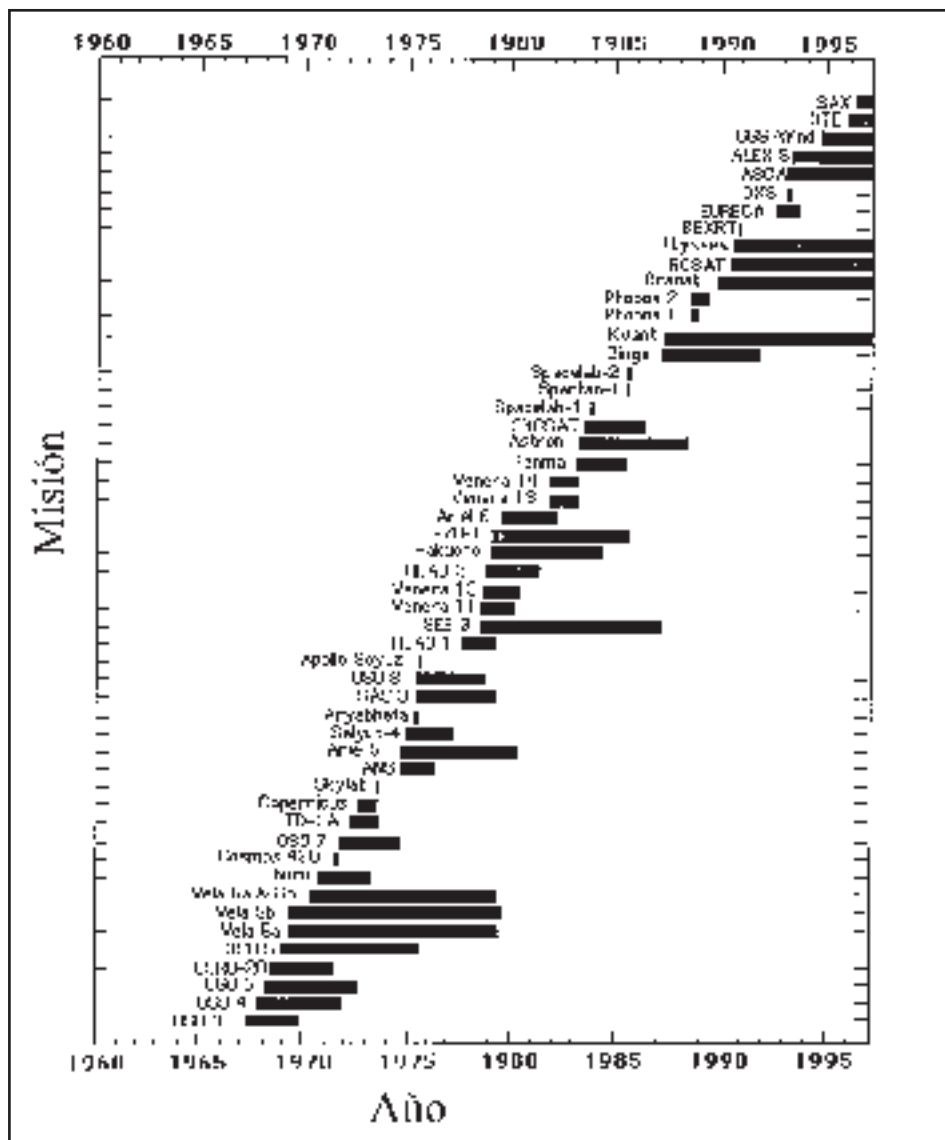


Fig. 78: Las misiones X lanzadas hasta 1997, ordenadas según la fecha de lanzamiento. Cortesía de J. S. Allen. (NASA-GSFC)

CAPÍTULO 4

IV Fuentes de rayos X en nuestra Galaxia

Actualmente sabemos que hay numerosas fuentes astrofísicas de rayos X que vale la pena investigar. Entre ellas podemos citar de, mayor a menor:

a) la existencia de un fondo difuso de radiación X muy uniforme que cubre toda la esfera celeste,

b) el medio intercumular muy caliente existente en los cúmulos de galaxias y que es más masivo que la componente óptica, además de estar enriquecido por productos de la combustión nuclear,

c) la emisión de rayos X de las galaxias normales y sobretodo, de los núcleos activos de galaxias y su variabilidad a veces extremadamente rápida,

d) la emisión del gas difuso y caliente que parece rodear a las galaxias elípticas,

e) los mecanismos de acrecimiento de materia y generación de rayos X en sistemas binarios que contienen una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro,

f) la emisión de rayos X de los restos de supernovas,

g) la emisión coronal de las estrellas de casi todos los tipos espectrales, en especial, las estrellas frías activas,

h) la emisión térmica de rayos X de la componente caliente del medio interestelar galáctico o la absorción por la componente fría del mismo medio,

i) la emisión de rayos X de cometas o del planeta Júpiter, etc.

La astronomía X ha dejado de ser una disciplina centrada únicamente en los objetos más energéticos y violentos del Universo para dedicarse al estudio de casi todos los objetos celestes ya que, en la mayoría de ellos hay algún proceso físico capaz de generar fotones de alta energía. El Sol, por ejemplo, hemos visto que emite rayos X a partir de la corona y las regiones activas. En lo que queda de este capítulo veremos lo que se sabe acerca de la radiación X generada en nuestra propia galaxia, mientras que en el capítulo V trataremos de resumir algunos de los conocimientos sobre astronomía X del mundo extragaláctico.

4.1. De vuelta al Sol

Las estrellas no emiten rayos X normalmente. Sólo lo hacen en un rango de longitudes de onda entre aproximadamente 100 Å (ultravioleta extremo) y 10 micras (infrarrojo). La radiación emitida a longitudes de onda mayores corresponde a la radiación del polvo existente en el entorno de las estrellas mientras que a longitudes de onda más cortas, adentrándonos en los rayos X, la radiación ha de ser producida por mecanismos diferentes de los procesos térmicos normales que tienen lugar en la superficie de las estrellas. En el Sol, esto ocurre en la corona y en la cromosfera, donde se alcanzan temperaturas muy superiores a la de la fotosfera. Con el uso en 1948-49 de una emulsión fotográfica especial por parte de Burnight y, posteriormente de contadores Geiger en cohetes V2 utilizados por el grupo de Friedman, se vio que la corona solar emitía rayos X medibles y se pudieron hacer las primeras estimaciones de las características físicas de estas regiones.

La corona es la parte más externa de la atmósfera solar y tiene una densidad muy baja, del orden de miles de millones de veces menor que la de la fotosfera, por lo que prácticamente se puede considerar como el vacío, conforme a criterios terrestres. De hecho, mientras que el aire que respiramos tiene una densidad de aproximadamente 10^{-3} g/cm³, la densidad de la corona solar es menor que 10^{-15} g/cm³. Este material difuso se encuentra, sin embargo, a una temperatura muy alta, superior a un millón de grados, por lo que se puede identificar fácilmente con lo que llamamos un plasma ionizado. El plasma está compuesto por electrones, protones y algunos núcleos de helio, remanentes de los átomos originales, así como por pequeñas cantidades de otros elementos más pesados, fuertemente ionizados, que dominan el espectro de líneas de emisión en rayos X. Además, el plasma coronal es transparente a la luz visible y tiene una resistencia eléctrica muy baja, por lo que se encuentra fuertemente ligado a las líneas de campo magnético del Sol. La formación de tubos magnéticos, a partir de regiones bipolares en la superficie de la estrella, que encierran el plasma coronal, o la presencia de líneas de campo abiertas que dan lugar a los llamados agujeros coronales, se han podido conocer y estudiar únicamente a través de la observación del Sol en el rango X del espectro electromagnético.

Las últimas observaciones, proporcionadas por el satélite japonés *Yohkoh* (ver lámina 1) han permitido la obtención de imágenes espectaculares del Sol en rayos X, con gran resolución temporal y espacial. La calidad de las imágenes es tal, que se ha llegado a decir que de cada una de ellas podría extraerse un artículo científico. Estas imágenes permiten estudiar las configuraciones complejas de los campos magnéticos del Sol y sus movimientos así como los mecanismos de calentamiento y eyección del plasma que forma la corona solar. Una de las preguntas clásicas acerca de la física de la corona solar es, de hecho, cómo se puede calentar una región a partir de otra más fría. Parece una contradicción con los principios básicos de la termodinámica. Sin embargo, la contribución del plasma confinado

en los tubos magnéticos que se forman como consecuencia de la actividad solar así como las limitadas posibilidades de enfriamiento del plasma coronal debido a su baja densidad, hacen que se mantenga de forma estable una región de muy alta temperatura alrededor de la fotosfera relativamente fría. Las regiones intermedias entre la fotosfera y la corona (la cromosfera y la región de transición) emiten fundamentalmente en el rango ultravioleta mientras que la corona, más extensa y caliente, emite en rayos X. Para energías hasta unos pocos keV esta emisión de rayos X se debe principalmente a interacciones de los electrones de iones pesados de calcio, carbono, hierro, neón, nitrógeno, oxígeno, silicio, etc. Sin embargo, la contribución de los elementos más abundantes en el Sol, el hidrógeno y el helio, es prácticamente inapreciable al haber sido desprovistos de sus capas electrónicas. Una parte más importante de la radiación emitida se origina en interacciones de electrones no ligados a iones, a través del mecanismo de *bremssstrahlung* térmico (ver apéndice), llegando a dominar la luminosidad total a temperaturas del orden de 10 millones de grados como las que se alcanzan en las erupciones solares (figuras 80 y 81). Estas erupciones son el resultado de grandes liberaciones de energía, de forma impulsiva, en la corona solar y producen casi toda la emisión de rayos X duros del Sol.

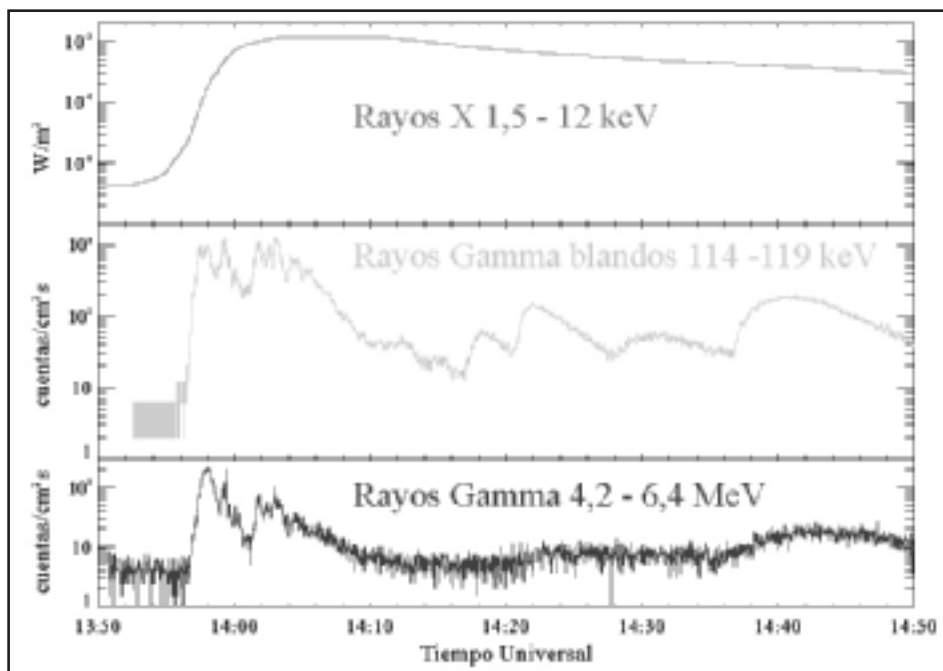
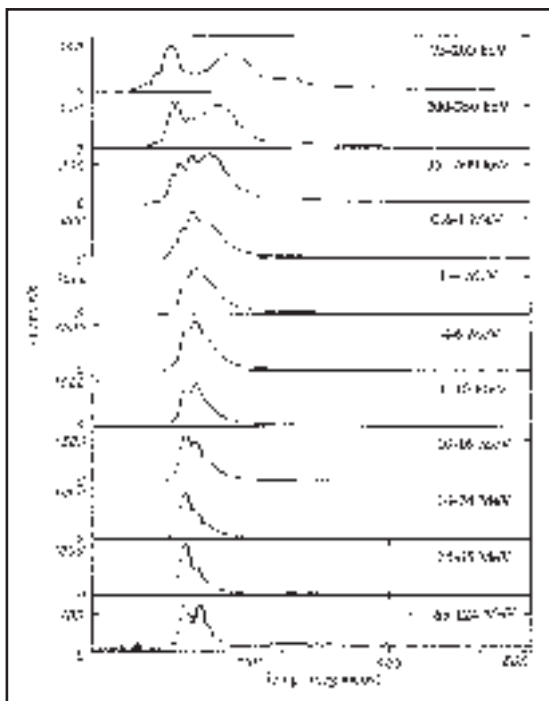


Fig. 80: Erupción solar del 6 de marzo de 1989. La fase llamada de pre-erupción dura hasta las 13:56 T.U. y se caracteriza por un aumento considerable del flujo de rayos X sin que aparezca todavía la emisión gamma. Cuando esto último ocurre, comienza la fase impulsiva durante la cual se producen picos de emisión. A las 14:06 T.U. se inicia la llamada fase gradual, durante la cual la emisión gamma empieza a decaer de manera más o menos exponencial. Lo mismo ocurre en el rago X, pero con una constante de tiempo mayor.

Fig. 81: Una de las fulguraciones solares ocurridas el 24 de mayo de 1990, tal como fue observada por PHEBUS en Granat, por encima de 75 keV. A estas energías, domina el proceso de emisión un bremsstrahlung no térmico, debido a electrones acelerados a más alta energía que los del propio plasma. De Oleg Terekhov y colaboradores, *Astronomical Letters* 19(2), American Institute of Physics, pág. 66 (1993).



La erupción solar es una especie de explosión esporádica e impredecible en la corona, que dura unos pocos minutos, y cubre una pequeña parte de la superficie solar, del orden del tamaño de la Tierra, pero libera grandes cantidades de energía (hasta 10^{32} erg o más) y lanza al medio interplanetario una componente importante de la radiación cósmica: las partículas energéticas del Sol. Estas erupciones se encuentran ligadas a las manchas solares, donde los campos magnéticos son especialmente intensos y se encuentra la base de los tubos magnéticos que mantienen la alta temperatura coronal (figura 82). Las grandes erupciones sólo ocurren unas pocas veces al año, alrededor de la época del máximo solar, que ocurre cada 11 años aproximadamente (el próximo se espera hacia el 2001). Con la instrumentación actual, se siguen detectando fulguraciones tan débiles como 10^{27} erg, que duran pocos segundos y que también siguen el ciclo solar, llegando a observarse hasta varias decenas al día en el mejor de los casos.

4.2. ¿Y en el Sistema Solar?

Antes de abandonar el Sol, presentamos en la figura 83 una imagen de la Luna en rayos X obtenida con el satélite *Rosat*. Ver también la lámina 8. Al igual que ocurre en el óptico, la Luna es visible en rayos X porque su superficie refleja la radiación solar. Así vemos que la mayor emisión viene de la parte iluminada por el Sol. Recordemos que la Astronomía X nació, de hecho, en 1962 como resultado

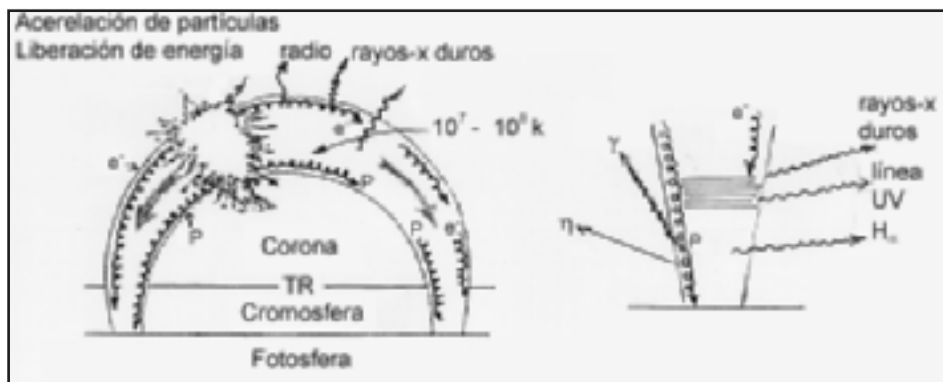


Fig. 82: Una fulguración solar producida como consecuencia de una liberación intensa y repentina de energía, que ocurre en las zonas donde el campo magnético está cambiando por diversas causas. Cortesía de Benjamin Montesinos.

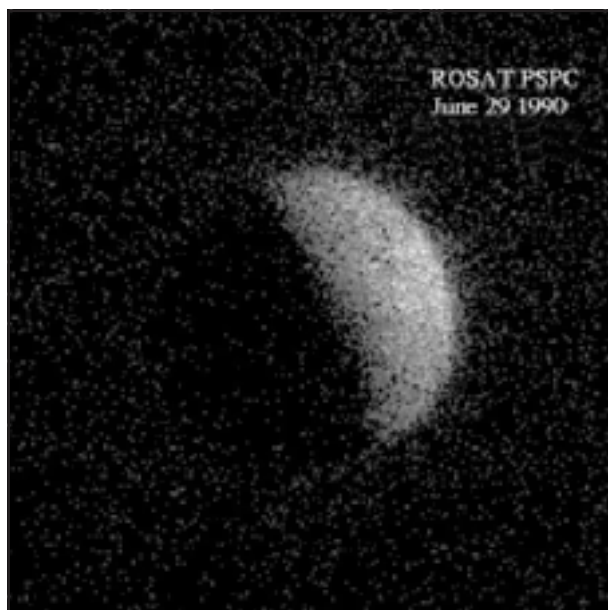


Fig. 83: Imagen de la Luna obtenida con el satélite Rosat. De J. H. Schmitt y colaboradores, *Nature* 349, MacMillan, Londres, pág. 585 (1991).

de un experimento fallido de observar los rayos X de la fluorescencia lunar por Giacconi (ver capítulo I) y que dio lugar a la detección de la fuente Sco X-1, la más intensa del cielo, así como del fondo de radiación difusa. Después de 28 años se ha obtenido una imagen que permite además ver cómo la cara oscura de la Luna oculta radiación X, demostrando una vez más, el origen cósmico de la mayor parte de esta radiación. La pequeña emisión de rayos X de la cara no iluminada de la Luna es real, ya que supera el ruido de fondo de los detectores PSPC de *Rosat*, y se explica como radiación de frenado de los electrones del viento solar que impactan sobre la Luna después de ser guiados fuera de la trayectoria normal por el campo magnético interplanetario del Sol.

El satélite *Einstein* observó emisión en rayos X en el planeta Júpiter, y recientemente también lo han logrado *Rosat* y *Asca* (lámina 2). Dicha emisión, se piensa que es producida por radiación de frenado de partículas inyectadas en la magnetosfera joviana por Ío, el único satélite del Sistema Solar que tiene actividad volcánica.

Por lo que respecta a otros objetos, cabe destacar en 1996 el inesperado descubrimiento por *Rosat* de emisión X proveniente del cometa Hyakutake (figura 84 y lámina 3), un día después de su máximo acercamiento a la Tierra, el 25 de marzo. El número de fotones detectados era 100 veces superior a las predicciones más optimistas. Además la emisión era fuertemente variable en cuestión de algunas horas. Una de las teorías propuestas explica dicha emisión como fotones X provenientes del Sol que fueron reabsorbidos por la nube de moléculas de agua que rodea al núcleo del cometa, siendo reemitidos por las propias moléculas. Este proceso recibe el nombre de fluorescencia. También se ha sugerido que la emisión X fuera el resultado de la colisión entre el material cometario y el viento solar, siendo esta la hipótesis con mayor aceptación: los átomos altamente ionizados de oxígeno, carbono y nitrógeno que se transportan por el viento solar, interaccionan con las moléculas de agua de la coma cometaria. Es entonces cuando se transfiere un electrón desde las moléculas al ión, quedando este último en un estado excitado inestable, por lo que se emite un fotón de rayos X para volver al estado más estable. Este inesperado descubrimiento ha motivado una búsqueda en la base de datos de *Rosat*, encontrándose otros tres cometas para los cuales se ha detectado emisión X. Por supuesto, ningún satélite perdió la oportunidad de observar (y detectar) la emisión X del espectacular cometa Hale-Bopp en 1997.



Fig. 84: Imagen del cometa Hyakutake obtenida con Rosat.

4.3. Estrellas activas

La corona de las estrellas, igual que la del Sol, es un gas a una temperatura de varios millones de grados, suficiente para que su radiación térmica de frenado sea observable en rayos X. Sin embargo su intensidad es generalmente débil y la radiación X sólo representa un pequeño porcentaje de la emisión de las estrellas en todo el espectro electromagnético. El caso del Sol es un claro ejemplo de ello aunque su proximidad haya permitido la medida de la radiación X coronal con mucho detalle. Uno de los descubrimientos más interesantes de la misión *Einstein* fue la emisión de rayos X procedentes de coronas estelares calientes alrededor de muchas estrellas normales, con una intensidad ciertamente mayor que lo previsto en el caso del Sol. Estrellas de casi todos los tipos espectrales presentan coronas calientes que emiten rayos X con luminosidades del orden de 10^{26-31} erg/s para las estrellas frías, de los últimos tipos espectrales, y del orden de 10^{29-34} erg/s para las más calientes, de tipo O y B. Los rayos X observados se tienen que originar por equilibrio colisional en plasmas ópticamente delgados y, el estudio de la emisión coronal de muchas estrellas frías, de los últimos tipos espectrales, ha permitido de hecho, acercarnos a la comprensión de numerosos problemas planteados con el Sol. ¿Cuál es el mecanismo de calentamiento de las coronas estelares?, ¿cómo depende este calentamiento de otros parámetros físicos como la luminosidad, la pérdida de masa, la convección estelar, la rotación o la edad?, ¿cuál es la estructura de la corona? (es decir ¿cómo se distribuye el plasma en temperatura y densidad en función del confinamiento magnético?), o bien ¿cuál es la variabilidad de las coronas estelares? Sólo estudiando un abanico amplio de casos diferentes con emisiones X más intensas que la solar, es posible llegar a conclusiones sobre una cierta base estadística.

Por ejemplo, las observaciones en rayos X con *Exosat*, han permitido poner de manifiesto la baja importancia relativa en el calentamiento de las coronas estelares mediante la disipación de energía en ondas de choque generadas por ondas acústicas en las capas convectivas. Pero, las altas temperaturas observadas en las coronas estelares implican unas energías cinéticas que hacen imposible mantener una atadura del gas a la estrella de tipo gravitacional y exige la presencia de un confinamiento magnético. De nuevo, nos encontramos con una conexión importante entre la actividad magnética de las estrellas frías y el calentamiento del gas coronal. La comprensión cuantitativa de los mecanismos físicos involucrados requiere el estudio de las relaciones existentes entre la fotosfera, la cromosfera y la actividad coronal, así como con la luminosidad en rayos X de la estrella. Por su parte, esta luminosidad debe depender, por lo menos, de la edad, la rotación, la composición química y la configuración del campo magnético. Las observaciones así lo demuestran. Por un lado, se ha encontrado una clara relación entre la luminosidad en rayos X y el flujo de emisión en líneas espectrales características de la cromosfera estelar. Además, el estudio de la variabilidad de la emisión de rayos X coronales permite la estimación de las escalas de tiempo características de los

mecanismos de calentamiento. Por otro lado, se encontró que la intensidad de la emisión de rayos X de las estrellas de los últimos tipos espectrales está relacionada con la velocidad de rotación y con la profundidad de la capa convectiva, indicando que el mecanismo de calentamiento de la corona emisora de rayos X debe estar relacionado con la liberación de energía en las líneas del campo magnético de la estrella, retorcidas por la rotación diferencial de las capas convectivas. Finalmente, estudiando la radiación X de estrellas individuales en cúmulos abiertos con el satélite *Rosat* se ha comprobado que mientras que las estrellas más brillantes en el óptico (por lo general más masivas) dejan de ser visibles, aparecen con nitidez las estrellas poco masivas y débiles. Ello es debido a la interacción de la rotación con el campo magnético y los movimientos turbulentos que tienen lugar en las capas convectivas de la envoltura de estas estrellas. Esta medida de la actividad estelar pone de manifiesto una fuerte dependencia de la emisión de rayos X con la edad de la estrella ya que conforme envejece, disminuye su velocidad de rotación y, por tanto, el mecanismo que produce la energía observada en el rango X. Al observar un cúmulo abierto como las Pléyades (láminas 4 y 5), en que todas las estrellas tienen la misma edad aproximadamente, se pone de manifiesto la diferencia de emisión debida a la masa de las estrellas y su correspondiente grado evolutivo, o lo que es lo mismo, su posición en la línea definida por la edad del cúmulo.

Tanto *Exosat* como, más recientemente, *Rosat* estudiaron numerosos sistemas binarios con componentes activas de los últimos tipos espectrales. En concreto, observaron la variación en rayos X de los sistemas AR Lac y TY Pyx durante todo su periodo orbital. Este tipo de estrellas emiten rayos X originados en coronas calientes alrededor de componentes muy activas y se conocen como sistemas del tipo RS CVn por la estrella binaria que es prototipo del grupo. La actividad que presentan se cree que está relacionada con grandes manchas, similares a las que observamos en el Sol, en una o ambas componentes, y que producen de algún modo una gran cantidad de energía en la corona que les rodea. Las estrellas activas representan un caso extremo de la actividad solar, en donde los procesos son aumentados por la proximidad de una compañera, el incremento de la velocidad de rotación, la presencia de capas convectivas más profundas, etc. Por ello, son un método idóneo para el estudio de la conexión entre los diversos procesos físicos involucrados. La investigación en este campo trata de estudiar los mecanismos para la generación de campos magnéticos, la conversión de energía no radiativa en energía térmica y los mecanismos de calentamiento del plasma, los procesos de pérdida de masa y del momento angular de las estrellas, y su variación evolutiva. El satélite *Exosat* descubrió la presencia de erupciones de rayos X en la estrella TY Pyx (ver figura 85), que se observó luego en otras estrellas activas, incluyendo la componente fría del sistema Algol (β Per). Por otro lado, el satélite *Rosat* determinó la distribución de temperatura que tiene lugar en las coronas de las estrellas activas, a través de espectroscopia de banda ancha en el rango X, demostrando un claro comportamiento bimodal en el caso del sistema de Capella

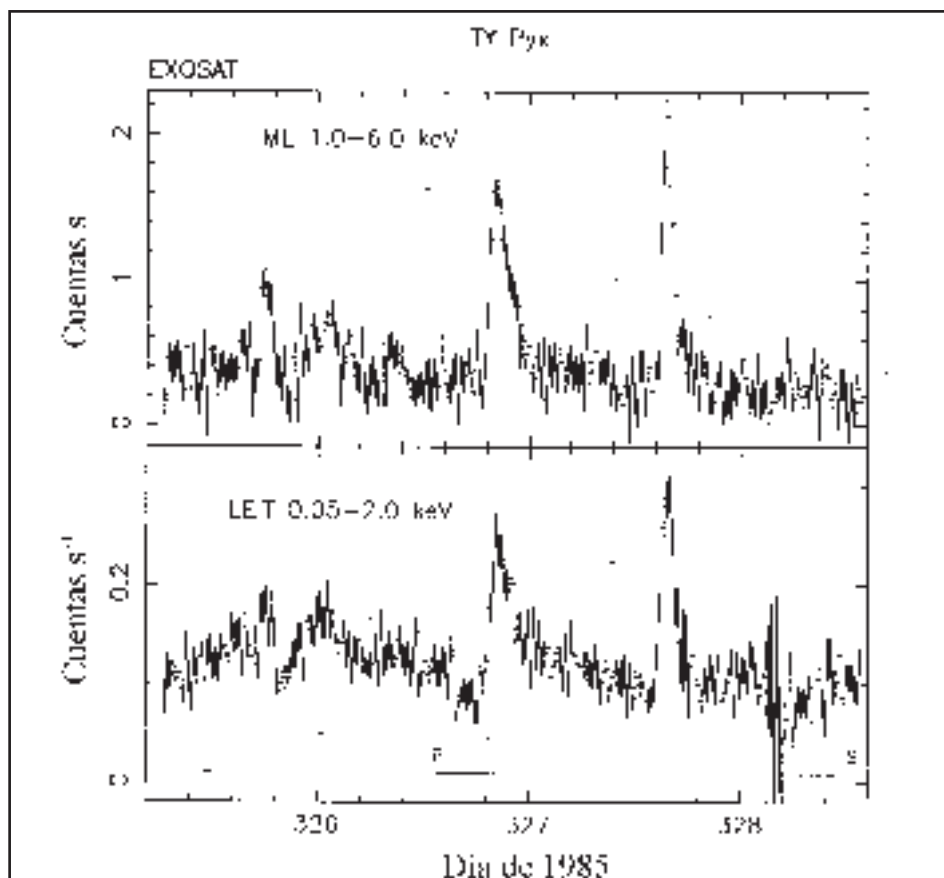


Fig. 85: Erupciones de rayos X en la estrella TY Pyx observadas con Exosat. De J. L. Culhane y colaboradores, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 243, Blackwell Scientific Publications, Londres, pág. 424 (1990).

(α Aur), en el sentido de que hay un pico de emisión alrededor de los 2 millones de grados y otro en torno a los 17 millones (figura 86). Un estudio detallado de las observaciones ha permitido, sin embargo, deducir que la mejor explicación se obtiene, no con dos plasmas a diferente temperatura, sino con un plasma a varias temperaturas cuya medida de emisión es función de la temperatura. Hoy en día se acepta que la mayoría de las erupciones X -muchas de ellas sólo detectadas una vez y en objetos aún no identificados- observadas por *Vela*, *SAS-3*, *Ariel 5*, *HEAO-1* y *Rosat*, tienen su origen en estrellas con coronas activas, como las RS CVn y estrellas «flare» dMe-dKe.

Simultáneamente, se han obtenido numerosos datos espectroscópicos de las estrellas binarias del tipo RS CVn que indican líneas de emisión, incluso en el rango X. En el caso ya reseñado de α Aur, se han realizado estudios más detallados, encontrándose emisiones de varios estados fuertemente ionizados del Mg, Ne, O, y Fe. Estos resultados sólo pueden interpretarse como emisión de rayos X proce-

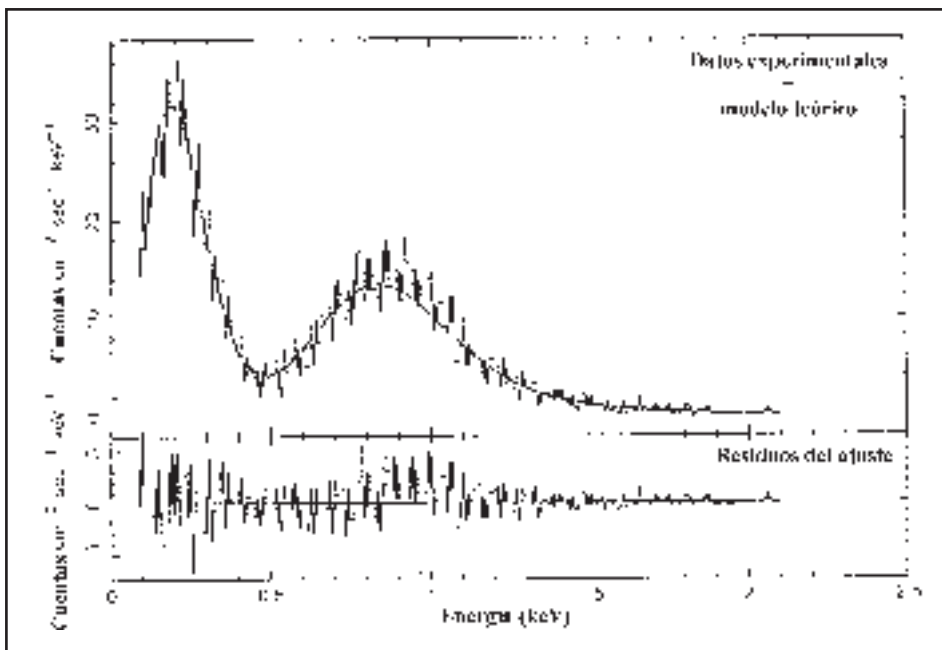


Fig. 86: Observación del sistema de Capella (α Aur) por parte de Rosat. Solamente modelos térmicos con una distribución bimodal de temperaturas (2 y 17 millones de grados) pueden ajustar el espectro observado. De R. Dempsey y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 413, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, pág. 335 (1993).

dente de un plasma caliente confinado en una estructura de tubos magnéticos que se extienden muy por encima de la superficie estelar. Estas estructuras tubulares de calentamiento de la corona también parece que se han observado en algunas estrellas calientes de tipo O, a pesar de la presencia de vientos estelares más intensos. En las estrellas activas se han observado además líneas de emisión de helio ionizado (He II) en el rango ultravioleta a 1.640 \AA con el satélite *IUE*, indicadora del calentamiento de la región de transición por parte de la corona.

Las estrellas activas, no sólo se presentan en sistemas binarios en los que las estrellas de los últimos tipos espectrales, con profundas capas convectivas, son aceleradas en su rotación gracias al efecto de las mareas producidas por la estrella compañera en una órbita de corto periodo. También estrellas individuales, bien como las activas enanas frías del tipo M o K con líneas de emisión de Balmer (dMe o dKe) o bien estrellas cuya rotación es relativamente rápida por otras razones, por ejemplo si son suficientemente jóvenes, pueden presentar importantes muestras de actividad. Estas estrellas «flare» o eruptivas presentan una gran variedad de explosiones de este tipo que pueden llegar a ser tan breves como unos pocos segundos y de una intensidad muy superior a las que vemos en el Sol. De hecho, las estrellas de este tipo suelen ser menos masivas y más frías que el astro

rey , pero tienen unos intensos campos magnéticos que permiten la producción de erupciones con una luminosidad cien veces superior a la de la propia estrella. El satélite europeo *Exosat* fue uno de los que, aprovechando sus características orbitales, pudo aportar nuevas observaciones en rayos X de las estrellas eruptivas y por ejemplo, comprobó la estrecha relación existente entre la luminosidad en rayos X y la luminosidad en todo el rango espectral, o luminosidad bolométrica, durante las fases en calma (figura 87). Sin embargo, no se pudo encontrar ninguna relación aparente con la velocidad de rotación, como ocurre con las estrellas activas más masivas. De esta forma, el satélite *Rosat*, a través de la observación en rayos X, ha permitido una visión completamente nueva de los cúmulos de estrellas (láminas 6 y 7). Otro resultado importante, esta vez por parte de *Asca* ha sido la determinación de una abundancia de hierro en la corona de las estrellas activas que es sensiblemente menor que la solar.

Los sistemas binarios con estrellas activas, como los tipo RS CVn, son sin duda una fuente importante de información para comprender los mecanismos que relacionan las coronas estelares con la rotación y la actividad, pero hay muchas más estrellas dobles que emiten rayos X. Entre éstas se encuentran los sistemas binarios tipo Algol, en los que una de las componentes llena el volumen definido por la superficie crítica de Roche (cuadro VII) y transfiere materia a la estrella compañera.

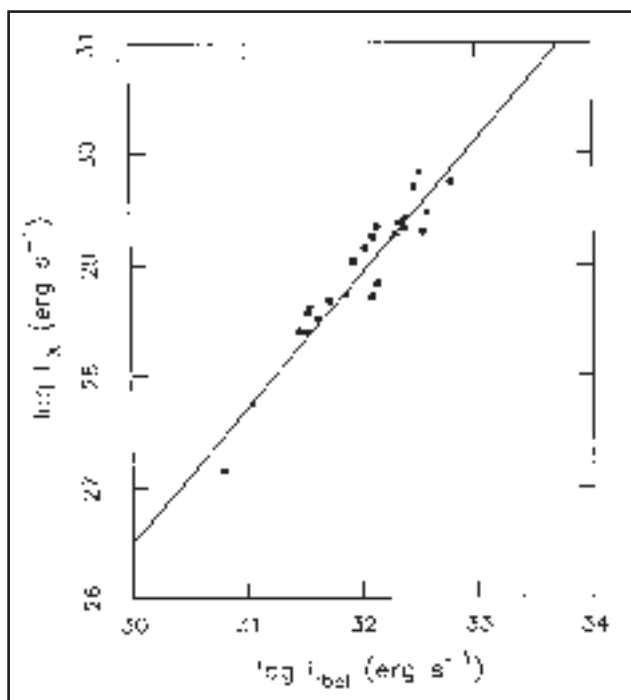


Fig. 87: La relación entre luminosidad en rayos X y la luminosidad bolométrica, en estrellas eruptivas.

CUADRO VII. LOS LÓBULOS DE ROCHE

Las superficies de Roche no son otra cosa que equipotenciales, es decir, superficies a lo largo de las cuales puede moverse una partícula sin perder ni ganar energía. En una estrella individual, las superficies equipotenciales son esferas concéntricas alrededor de la estrella, pero en un sistema binario, la situación es más compleja y tenemos que tener en cuenta el campo gravitacional de las dos componentes así como la fuerza centrífuga correspondiente a la rotación alrededor del centro de masas común. En condiciones simplificadas se puede ver que las superficies equipotenciales alrededor de un sistema de dos estrellas próximas entre sí tienen la forma que mostramos en la figura 88. Esta distribución del campo gravitatorio nos recuerda las superficies equipotenciales que se obtienen para el campo eléctrico formado alrededor de dos cargas. En el conjunto de superficies equipotenciales, hay además una especialmente importante que llamamos superficie crítica de Roche, y que se corresponde con el punto de Lagrange L_1 en el que coinciden dos lóbulos alrededor de cada componente. Si una de las estrellas, a lo largo de su evolución, llega a expandirse alcanzando la superficie crítica correspondiente, la materia que se encuentre en el punto de Lagrange mencionado tendrá tendencia a moverse hacia la otra estrella del sistema binario.

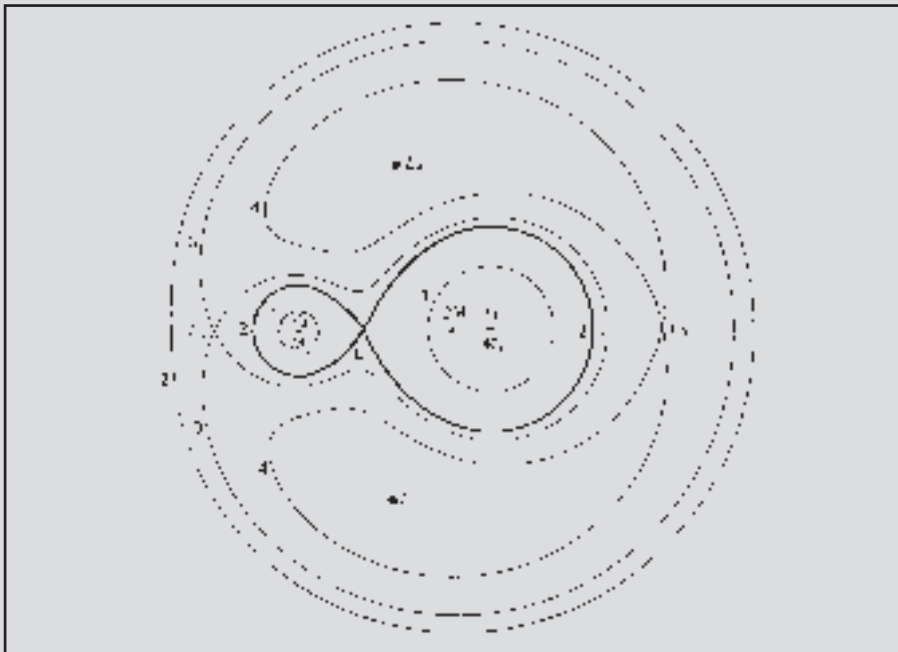


Fig. 88: Lóbulos de Roche en un sistema binario típico, denotadas con los números del 1 al 3. CM es el centro de masas del sistema formado por M_1 y M_2 . Y L_i ($i=1, \dots, 5$) son los puntos de Lagrange. La superficie crítica de Roche se ha señalado con trazo más grueso. De J. Frank, A. King y D. Raine, *Accretion Power in Astrophysics*, Cambridge University Press, Cambridge (1985).

Mientras que en los sistemas tipo RS CVn, ambas componentes se encuentran dentro de sus configuraciones críticas y la única pérdida o intercambio de masa posible se produce mediante viento estelar, en las binarias tipo Algol una de las estrellas llena su lóbulo de Roche y transfiere grandes cantidades de materia a su compañera. Ello hace que la estrella inicialmente más masiva del sistema se convierta en la menos masiva. La emisión de rayos X que se produce en las binarias tipo Algol es todavía coronal y se origina en el entorno de la estrella que llena el lóbulo de Roche, por lo que nos permite estudiar las posibles modificaciones del campo magnético y la relación entre cromosfera y corona en condiciones muy especiales. La componente que recibe masa es una estrella normal y no emite rayos X de forma importante, excepto en algunos casos de transferencia en los que se forma un disco de materia alrededor de dicha estrella, que va siendo acrecida o acumulada sobre su superficie, y la nueva masa que cae sobre el disco puede formar unos puntos calientes en la región de impacto. Pero eso ya lo veremos en los siguientes apartados. Un descubrimiento reciente en el rango ultravioleta ha sido la ausencia de una línea de He II prominente en 1.640 \AA como la observada en las estrellas tipo RS CVn, y que se cree que se origina como consecuencia de la ionización del helio de la región de transición por los fotones X de la corona y una posterior recombinación radiativa.

4.4. Enanas blancas.

Las enanas blancas -concebidas teóricamente por el inglés Sir Arthur Eddington en 1926 y posteriormente por su compatriota R. H. Fowler- son el resultado final de la lenta pérdida de la atmósfera en estrellas de hasta 4 veces la masa del Sol durante la fase de gigante roja. Es entonces cuando se forman las conocidas nebulosas planetarias (su nombre proviene de la semejanza con los discos planetarios) que un día albergarán en su núcleo a las enanas blancas. La masa de estos objetos no supera 1,4 veces la masa del Sol, como descubrió teóricamente el astrofísico de origen indio Subrahmanyan Chandrasekhar en 1930, y a quien se le dio el Nobel de Física en 1983. Un siglo atrás, en 1827, el alemán Friedrich Bessel ya había estudiado las desviaciones del movimiento en el cielo de Sirio, la estrella más brillante. Ello implicaba la existencia de un compañero, que no sería observado hasta 1862 por Alvan Clark, provisto de un refractor de 45 cm de diámetro. El objeto, Sirio B, era 10.000 veces más débil que Sirio A, e iba a ser la primera enana blanca observada.

4.4.1. Enanas blancas aisladas.

Recordemos que fue el americano Bruce Margon y colaboradores quienes con una carga a bordo de un cohete de sondeo detectaron por vez primera en 1974 la emisión X de una enana blanca aislada, HZ 43, ya recogida desde mediados de siglo en el catálogo de estrellas muy azules del americano Milton Humason y el

suizo-americano Fritz Zwicky (HZ). Independientemente también sería detectada por *SAS-3*. Más tarde se le descubriría una compañera, HZ 43B, estrella enana del tipo M que no interacciona con la enana blanca (HZ 43A). Posteriormente, *Einstein* y *Exosat* observarían otras (las más brillantes). Un espectro de HZ 43A se muestra en la figura 89.

En 1989, antes del lanzamiento de *Rosat*, todas las previsiones apuntaban a que el satélite, durante el monitoreado de todo el cielo, descubriría unas 5.500 enanas blancas. Aparte de HZ 43A, que era el objeto del cielo más brillante en el extremo ultravioleta (EUV), el resultado final fue que *sólo* 124 objetos de esta clase iban a ser descubiertos por su emisión X. ¿A que era debida tal discrepancia? Por ejemplo, una de las observaciones de *Rosat* se centró en un campo conteniendo dos enanas blancas, pero solamente una de ellas fue detectada. La no-detección de la segunda requería que la densidad columna fuera 10 veces superior a la de la primera, a unos 10' la distancia en el cielo. La explicación era que la presencia de elementos del grupo de hierro en la atmósfera de la enana blanca, rica en hidrógeno y helio, hacía que ésta fuera más opaca en el rango EUV-X blandos, debido a la absorción de estos fotones por parte de esos átomos (efecto fotoeléctrico).

Aunque en casi todos los casos la emisión X proviene de la fotosfera, calentada a temperaturas de 40.000-60.000 grados, *Rosat* detectó un objeto (KPD 0005+5106) en el cual la emisión X proviene de una corona estelar alrededor de la enana blanca. También el mismo satélite ha encontrado emisión X en la enana blanca situada en el centro de la nebulosa planetaria M 27, formada como resultado de la eyección de masa del progenitor de la enana blanca. Esto ya lo observó *Einstein* en otra planetaria, NGC 246. En el caso de la planetaria Abell 30, la emisión X es extensa, pudiendo explicarse como resultado de la colisión del viento estelar con el gas adyacente.

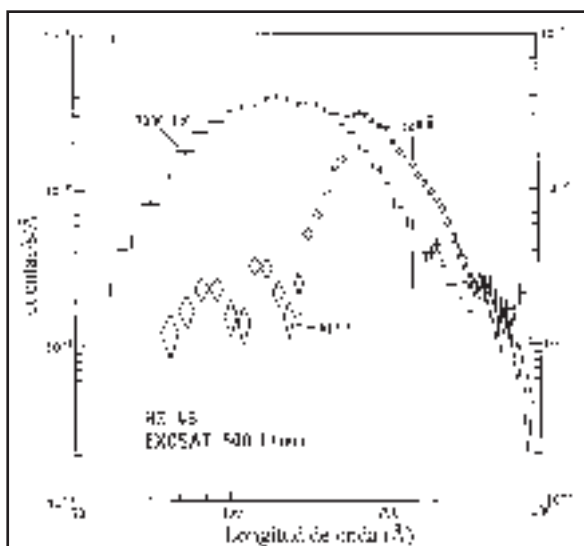


Fig. 89: Espectro de alta resolución de HZ 43A obtenido por Exosat. Las cruces corresponden al filtro 3000 LX y los diamantes al AII/P. De John Heise y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 334, *The American Astronomical Society*, *The University of Chicago Press*, pág. 959 (1988).

CUADRO VIII. EL DISCO DE ACRECIMIENTO

Aparte de la transferencia de materia de manera isótropa (esférica o flujo de Bondi por ser el físico de origen austriaco Hermann Bondi quien desarrolló el modelo), el caso más importante es el acrecimiento vía disco. Ocurre cuando el gas que se va a agregar tiene un momento angular $J \neq 0$ con respecto al objeto compacto, con lo que el acrecimiento no ocurre directamente, pues se ha de producir un transporte hacia afuera de J conforme se va a ir produciendo la deposición de materia.

En el caso de un sistema binario, formado por un objeto compacto de masa M_1 y una estrella compañera de masa M_2 en una órbita circular de separación a , la velocidad angular del sistema se deriva de la tercera Ley de Kepler:

$$\omega^2 = \frac{G(M_1 + M_2)}{a^3}$$

Y en el sistema de referencia del centro de masas, se puede describir el potencial de Roche como

$$\Phi_R(r) = -G \frac{M_1}{r_1} - G \frac{M_2}{r_2} - \omega^2 \frac{r^2}{2}$$

con r_1, r_2 las distancias de un punto r a las estrellas 1,2 como en la figura 88.

La figura también presentaba las superficies equipotenciales $\phi_R = \text{cte}$ para un potencial efectivo (gravitatorio+centrífugo) en el plano orbital de un sistema binario en órbita circular, en relación de masas de $q = M_2/M_1 = 10$. Los puntos de Lagrange (L_i) verifican $\phi_R = 0$. De este modo, la estrella compañera se expande hasta llenar su *lóbulo de Roche* y el gas fluye a través de L_1 (flujo supersónico). Transferencias de materia del orden de $M \sim 3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-8} M / \text{año}$ son posibles. Entonces, el plasma posee suficiente momento angular para que la transferencia de materia no se haga siguiendo la geometría esférica y así formar el disco de acrecimiento. El *radio de circularización* (r_c) es el radio de la órbita de mínima energía en la cual el gas aún conserva el momento angular inicial J_0 . Para un típico sistema con $q = 0,2$, se tiene que $rL_1 \sim 0,66a$ y $r_c \sim 0,16a$.

Considerando por simplicidad los discos delgados ($H/r < 10^{-2}$), es de reseñar que la viscosidad juega un importante papel en la fricción entre el gas en órbitas keplerianas adyacentes. El transporte de J implica una redistribución de masa en el disco. Se estiman viscosidades cinemáticas $\nu_c \sim 10^{15} \text{ cm}^2/\text{s}$. Es en este caso donde tiene cabida el llamado Modelo Estándar (Igor Shakura y Rashid Sunyaev 1973). Pero los detalles ya se escapan del contenido de este libro.

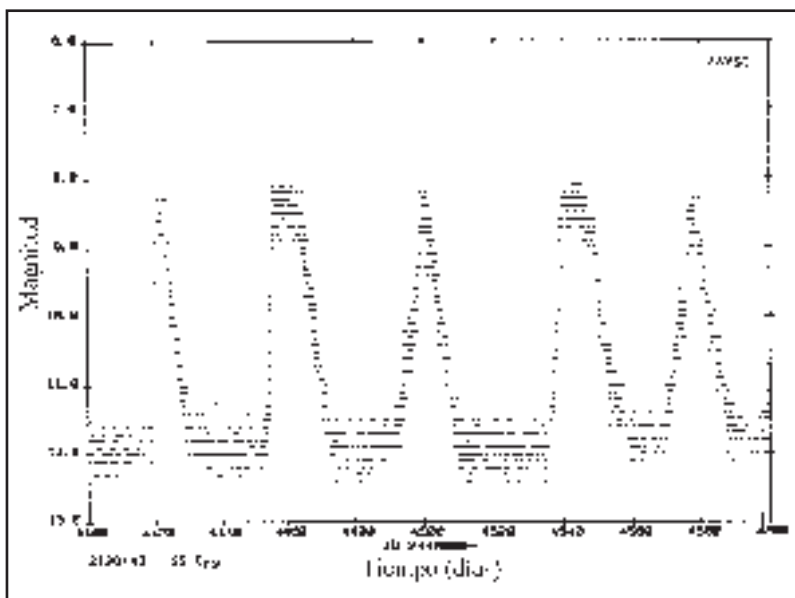
4.4.2. Enanas blancas en sistemas dobles: las variables cataclísmicas.

Las llamadas variables cataclísmicas -término acuñado por R.P. Kraft en 1962- son sistemas binarios de corto periodo (inferior a un día) y que están formados por una estrella enana fría (de masa entre 0,1 y 1 veces la masa del Sol) que llena el lóbulo de Roche, y por una estrella enana blanca, que recibe la masa perdida por su compañera a través del disco de acrecimiento que se forma conforme la materia va cayendo en espiral sobre el objeto compacto.

La primera detección (óptica) de una variable cataclísmica, la hizo Hind el 15 de diciembre de 1855, quien descubrió una estrella nueva de magnitud 9 en un campo estelar bien conocido por él. No en vano, ¡lo había estado observando los cinco años anteriores! Tras desaparecer a los pocos días, la estrella volvía a aparecer a intervalos de 60 a 150 días, por lo cual no era una nova clásica, sino U Geminorum, el prototipo de las que serían denominadas novas enanas. Lo raro es que él no la hubiera advertido durante los 5 años de observación.

La observación en rayos X de este tipo de objetos no se produjo hasta 1973, cuando el estadounidense Saul Rappaport y colaboradores, por medio de un cohete de sondeo, observaron la emisión de rayos X de una enana blanca en un sistema binario de tipo cataclísmico (SS Cyg, ya conocido en el óptico desde 1896, ver figura 90). SAS-3 descubrió el primer sistema binario con una estrella enana blanca fuertemente magnetizada (AM Her) a través de su emisión de rayos X y *Rosat* observó en 1990, por vez primera, la emisión X de una nova clásica, GQ Muscae, después de la explosión en 1981.

Fig. 90: Parte de la curva de luz óptica de la nova enana SS Cyg, de J. Mattei y colaboradores, 1985 (AAVSO Monograph 1).



Podemos considerar, cuatro grandes grupos de variables cataclísmicas: novae clásicas (que han aumentado de brillo entre 10 y 20 veces una vez), novae recurrentes (con amplitudes menores, pero que han sido observadas varias veces), novae enanas (que cambian de brillo en intervalos semiperiódicos de entre 10 a 100 días) y variables tipo nova (que presentan cambios de brillo irregulares). En las **novae clásicas** se producen explosiones termonucleares que conllevan la eyección de parte de la envoltura gaseosa, y la explosión es motivada por reacciones nucleares desbocadas a través del ciclo CNO. En las **novae recurrentes**, se producen igualmente explosiones termonucleares con eyección parcial de la envoltura. En las **novae enanas**, el aumento de brillo se debe a procesos de acrecimiento: se produce una inestabilidad en el disco de acrecimiento, lo que origina un anormal e importante flujo de materia hacia la enana blanca y la consecuente explosión. Se subdividen en U Gem, Z Cam y SU UMa. No se conocen estallidos en las **variables tipo nova** (el cuarto grupo), y en éstas se pueden distinguir cuatro categorías, cada una de ellas representadas por la estrella prototipo: UX UMa, VY Scl, DQ Her y AM Her.

4.4.3. Fuentes supersuaves.

Fueron ya detectadas por *Einstein* y *Exosat*. Son objetos luminosos, con luminosidades X cercanas al límite de Eddington para objetos de masa solar, y cuyos espectros X se ajustan a la emisión de un cuerpo negro con temperaturas entre 100.000-600.000 grados, siendo pues la característica principal la gran emisión de rayos X blandos. *Rosat* ha detectado siete fuentes supersuaves en nuestra galaxia. Una de ellas es la ya mencionada nova GQ Muscae y dos son estrellas simbióticas (parecidas a las novae recurrentes pero sin la presencia de explosiones). La explicación más aceptada para el origen de la emisión X en estas fuentes supersuaves es que se tratan de enanas blancas en sistemas binarios y a las que se les transfieren entre 1 y 4×10^{-7} masas solares por año, quemándose dicha materia (rica en hidrógeno) y produciéndose la emisión observada.

4.5. Supernovas y nebulosas remanentes de explosiones supernova

La espectroscopía de rayos X puede proporcionar gran cantidad de información acerca de los fenómenos físicos que tienen lugar en nuestro entorno. Uno de los tipos de objetos que mejor pueden estudiarse en rayos X son los restos de supernova (SN), que en el rango óptico aparecen como una envoltura delgada y aproximadamente esférica en expansión. Las explosiones supernova son el origen de estos restos en el medio interestelar y la envoltura que observamos no es más que una onda de choque, que se propaga a través del polvo y gas de la galaxia comprimiéndolo y calentándolo a temperaturas del orden de un millón de grados. El gas caliente emite rayos X blandos y la casi totalidad de la información que hoy día tenemos de estos remanentes de las explosiones supernova proviene de las observaciones en el rango de los rayos X.

Desde muy pronto se vio que la ya reseñada nebulosa del Cangrejo (Tau X-1) presentaba características diferentes de las de la mayoría de los demás restos de supernova en rayos X. Esta nebulosa presenta una estructura amorfa, una alta luminosidad en rayos X y un púlsar en el centro. Este púlsar es una estrella de neutrones fuertemente magnetizada que rota a una velocidad de unas 30 vueltas por segundo, cosa que descubrieron Bolton y Stanley en 1949. Por medio de cohetes, se demostró que la emisión de rayos X de la nebulosa del Cangrejo estaba fuertemente polarizada, lo que avala el origen sincrotrónico de dicha radiación. En este caso, los rayos X de la nebulosa son generados por electrones relativistas que giran alrededor de intensas líneas de campo magnético dando lugar a una radiación de tipo sincrotrón. En la mayoría de los restos supernova, sin embargo, la radiación X es producida por mecanismos de tipo térmico, libre-libre como la ya referida radiación de frenado. Pronto se vio que el espectro de rayos X de otro resto de supernova, conocido como la nebulosa del Velo en el Cisne (NGC 6992-95), indicaba radiación del mismo tipo. En 1970 se obtuvo una imagen unidimensional de la nebulosa con un colector de incidencia rasante y, más tarde, mediante un barrido con cinco ángulos diferentes se reconstruyó una imagen bidimensional. Finalmente, un vuelo en 1977 permitió la obtención de una auténtica imagen bidimensional de toda la nebulosa con óptica de tipo Wolter I, y las imágenes mostraron claramente la estructura de las ondas de choque con temperaturas del orden de un millón de grados en expansión a través del medio interestelar.

Las primeras imágenes de rayos X con satélite fueron obtenidas con *Einstein*, y mostraron la morfología de 47 restos de supernova, como la del Velo, Cassiopeia-A, Tycho, SN1006, IC 443, Puppis-A y Vela. Se descubrieron más de una docena de objetos colapsados en los centros de dichos restos de supernova a través de nebulosas emisoras de rayos X de origen sincrotrónico, y del análisis de más de 30 restos en la Nube Grande de Magallanes se han podido establecer importantes condiciones de contorno por lo que se refiere a su evolución. Mediciones del satélite mostraron que en restos de supernova jóvenes no existía equilibrio en los procesos de ionización. Esto significa que es necesario un conocimiento detallado del comportamiento hidrodinámico del gas que barre el medio interestelar para interpretar los espectros observados. Observaciones de Cas A, muestran variaciones de velocidad radial en distintas zonas indicativas de una expansión asimétrica de la nube, lo que puede estar ligado a la densidad no homogénea del medio interestelar que va siendo atravesado.

Todavía está fresca en nuestra memoria la explosión de la supernova SN1987A en la Gran Nube de Magallanes, que tuvo lugar sólo tres semanas después del lanzamiento del satélite japonés *Ginga*. En el momento de la explosión se registraron avalanchas de neutrinos en los experimentos que entonces se encontraban funcionando para la detección de estas difíciles partículas provenientes del Sol. Las medidas de rayos X de la supernova rastrearon durante semanas la emisión que pudiera escapar de la densa nube de polvo y gas, que había sido eyectada

por la estrella que explotó, como restos en expansión. Tanto el observatorio japonés como el módulo *Kvant* en la estación espacial *Mir*, detectaron rayos X de la supernova en julio de 1987, unos cinco meses después de la explosión. Posteriormente *Rosat* y el experimento BBXRT en la lanzadera espacial *Columbia* pudieron medir límites superiores de la radiación X. BBXRT obtuvo un límite superior veinte veces más bajo que *Rosat*. *Ginga* detectó la emisión X unos 120 días después de la explosión, y continuó observando cada 2 ó 3 semanas hasta el final de la misión. Ver figura 91. Hubo detección en todo el dominio X, siendo interpretado como resultado de la comptonización de fotones gamma originados en la producción del ^{56}Co . Un fuerte aumento de producción de rayos X blandos se observó en enero de 1988, aunque no se puede atribuir con seguridad a SN1987A. De ser cierto, tendría que ver con la colisión con el medio interestelar de las capas eyectadas en la explosión SN. A los 1.000 días, la supernova dejó ya de ser detectada en el rango X. Actualmente, y teniendo en cuenta las observaciones ópticas proporcionadas por el *Telescopio Espacial Hubble*, en las que se observa un anillo de denso gas probablemente formado por eyecciones de materia anteriores a la explosión SN en forma de viento estelar pre-SN, se espera que hacia el año 2003, la materia eyectada en la explosión SN alcance al anillo de gas y se produzca de nuevo una fuerte emisión en X.

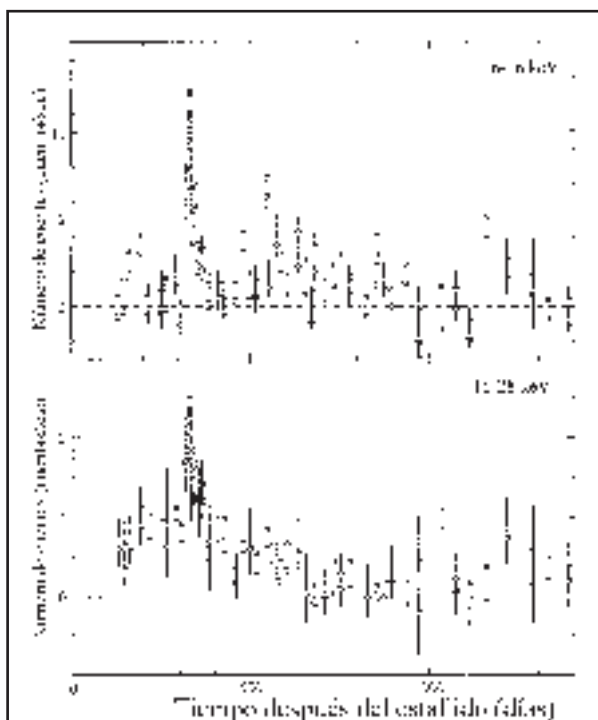
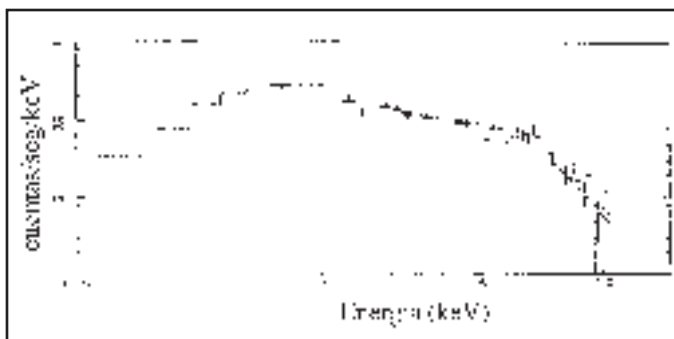


Fig. 91: Curva de luz en rayos X de SN1987A en dos rangos de energía, tal como fue observada por *Ginga*. De H. Inoue y colaboradores, Publications of the Astronomical Society of Japan, 43, Tokio, pág. 217 (1991).

Por lo que se refiere a otras SNs, tanto *Rosat* como *Asca* han observado SN1993J -descubierta por el aficionado español Francisco García- en la galaxia M81, habiéndolo detectado emisión X tan pronto como pudieron apuntar allí sus instrumentos, sólo seis días después de la explosión (lámina 17). El espectro X revelaba una línea de emisión del hierro (figura 92). Además, *Rosat* ha permitido ahondar más en la morfología de los restos de SN en nuestra galaxia gracias a la mejor resolución espacial (figura 93 y lámina 10).

Fig. 92: Espectro en rayos X de SN1993J obtenido por *Asca*. El modelo que mejor ajusta los datos es una ley de potencias con absorción a bajas energías y una línea de emisión de Fe a 6,8 keV. De H. Inoue, Y. Kohmura y el equipo de *Asca*, en *First Results of Asca*, Universal Academy Press, Tokio, pág. 125 (1994).

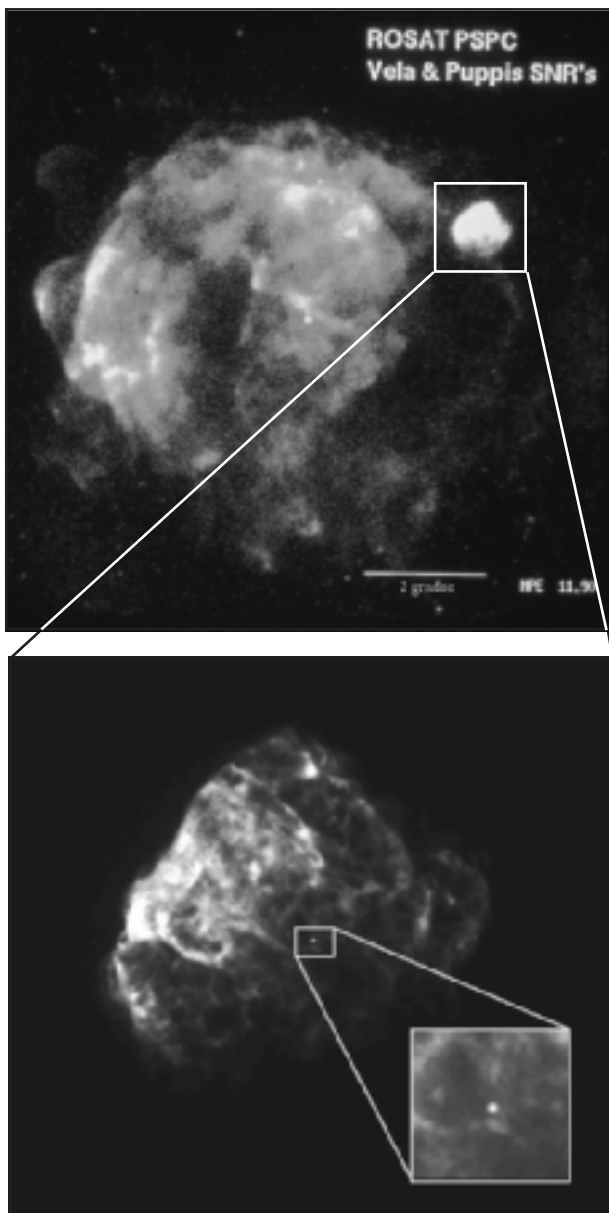


La espectroscopía de rayos X puede proporcionar gran cantidad de material observacional para estudiar las condiciones físicas que tienen lugar en las regiones gaseosas de los restos de supernovas. El primer paso ha sido lógicamente la búsqueda de líneas de emisión para dilucidar en cuáles de estos objetos la radiación es de origen térmico o no.

En las fuentes en las que el origen de la radiación es térmico, se puede determinar la temperatura e investigar el estado de ionización de la región, al igual que las masas y densidades. También se puede estudiar la composición del gas y distinguir el material realmente eyectado por la explosión del que es simplemente barrido por la expansión de la onda de choque en el medio interestelar. En este último caso se podrá además investigar el tipo de estrella que provocó la explosión supernova y el tipo de supernova que produjo el remanente observado. Por otro lado, se pueden realizar estudios cinemáticos del gas presionado por la onda de choque y calcular densidades de energía que, haciendo uso de modelos adecuados, permiten estimar la energía total inicial de la explosión.

La inexistencia de líneas de emisión junto con una pendiente de la radiación continua de acuerdo con una ley de potencias y no con la propia de una radiación térmica, sería la prueba de una componente no térmica predominante, seguramente de tipo sincrotrón. En el caso de estas fuentes que emiten radiación no térmica, podemos determinar una serie de valores (el espectro de energías de las partículas radiantes, la densidad de energía mínima, intensidades de equipartición del campo magnético), y estudiar los procesos de aceleración de las partículas. Uno de los principales descubrimientos de *Asca* ha sido la detección de rayos X no térmicos en SN 1006, un lugar donde se están acelerando los rayos cósmicos.

Fig. 93: Arriba: Al igual que en la portada de este libro, tenemos en una misma imagen del RAAS de Rosat dos de los residuos de supernova más impresionantes del firmamento: Vela y Puppis-A. Vela es de los más cercanos (1.500 años-luz), subtendiendo más de 7 grados de diámetro. Se produjo hace 13.000 años y desde entonces se ha expandido hasta alcanzar 200 años-luz. Más lejano se encuentra Puppis-A (de menor tamaño y más concentrado) que es una de las fuentes más brillantes en el cielo de rayos-X. Se originó hace 6.000 años a una distancia de 4.000 años-luz. De W. Voges, en *First Results of Asca*, Universal Academy Press, Tokio, pág. 197 (1994). Abajo: Se muestra también la imagen de Pup-A a través del HRI. Nótese la diferencia en resolución espacial. Se distinguen bien los filamentos así como la estrella de neutrones asociada a la supernova (recuadro). La temperatura de ésta es de unos 3 millones de grados, habiéndose calculado una masa de 25 M para su progenitor. Se estima que la explosión supernova fue muy asimétrica (a tenor de la morfología observada) y que además, la estrella de neutrones salió expulsada (como en rayos-X causa de la explosión) con una velocidad de unos 1000 km/s. Ahora sólo falta detectar las pulsaciones. Cortesía de S. Snowden, C. Becker, R. Petre and F. Winkler.



Por otro, y como hemos dicho anteriormente, las fuentes de radiación X pueden ser utilizadas para estudiar la absorción de los rayos X blandos por el medio interestelar entre la fuente y nosotros. De esta forma, se pueden trazar mapas del medio interestelar en nuestro entorno galáctico e incluso estimar la distancia a la que se encuentran los restos de supernova utilizados, como ha obtenido *Rosat* para muchas.

Ginga, y sobre todo *Asca* han realizado medidas espectroscópicas de alta resolución que muestran evidencias de nucleosíntesis del oxígeno, el silicio y el azufre en las supernovas. Esta línea del hierro (Fe XXV a 6,7 keV) se produce por los átomos de hierro que han perdido todos sus electrones excepto dos, por lo que al ión se le denomina Fe XXV. Su detección es muy importante porque confirma la temperatura muy alta del plasma emisor de rayos X como consecuencia de las ondas de choque la explosión supernova al viajar por el medio interestelar y, por tanto, el origen térmico de la radiación y no de tipo sincrotrón como es el caso de la nebulosa del Cangrejo (lámina 11). En segundo lugar, permite estimar la temperatura del plasma y la abundancia de hierro en el gas. La abundancia del hierro es particularmente interesante por ser un elemento que se genera en el interior de las estrellas y depende fuertemente de los procesos de evolución estelar.

4.6. Estrellas de neutrones y agujeros negros.

4.6.1. Estrellas de neutrones aisladas: *Geminga*.

Geminga es la fuente más brillante del cielo gamma, descubierta por *SAS-2* en 1973. Su nombre le fue dado en 1975 durante una búsqueda en radio (en GEMINI una fuente GAMMA), con inspiración en el dialecto milanés «*ghé` minga*» que significa «no está allí». Naturalmente nada se encontró en radio. La posición sería mejorada por el satélite gamma europeo *COS-B*, cosa que aprovechó *Einstein* para estudiar la zona de error. El resultado fue el hallazgo de una fuente muy interesante: 1E 0630+178. La baja absorción interestelar que se infería del espectro X indicaba que se encontraría cerca, y lo que es más importante: en el radio de 3,5" de incertidumbre con la que se daba la posición, no había contrapartida óptica alguna. El hallazgo se produjo al descubrirse un objeto muy azul (con magnitud 26,5) dentro de dicha zona.

La observación realizada por *Rosat* en 1991 permitió detectar una periodicidad de 237 ms en 1E 0630+178, lo que situaba a *Geminga* entre los púlsares X relativamente jóvenes. Gracias al *Hubble* fue posible determinar su distancia (160 pc). Posteriormente, *Asca* detectó fotones hasta 5 keV, con lo que los datos podrían ajustarse a una ley de potencias. El espectro X observado por *Rosat* (combinado con el de *EUVE*) se ajusta a un modelo de radiación de cuerpo negro a una temperatura de 500.000 grados, siendo la luminosidad $L_X \sim 10^{36}$ erg/s, que es lo que se esperaría de una estrella de neutrones de 10-15 km de radio a 160 pc. Nuevas observaciones con *Rosat* han mostrado la variabilidad del pulso X (figura 94).

Hasta la fecha se han detectado 16 estrellas de neutrones aisladas en el rango de los rayos X.

4.6.2. Binarias de rayos X.

Desde el punto de vista de los rayos X, los sistemas binarios más interesantes son aquellos que tienen una componente compacta (una estrella de neutrones o un

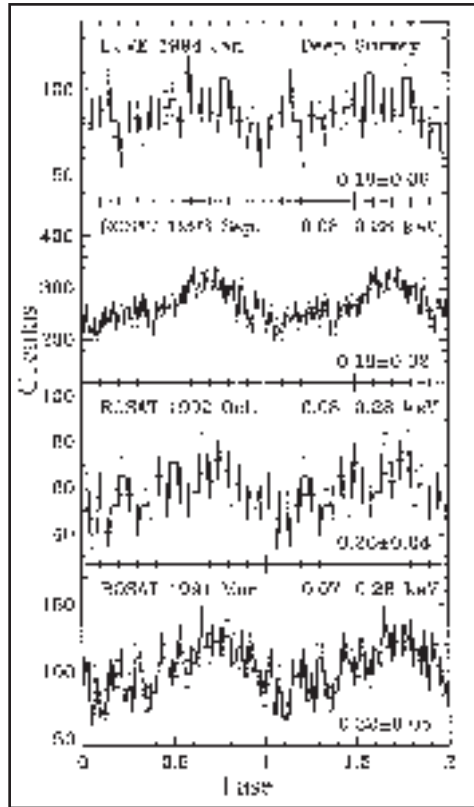


Fig.94: La variación del pulso de Geminga desde 1991 a 1994, según EUVE y Rosat. De J. Halpern, C. Martin y H. Marshall, *Astrophysical Journal*, 473, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, L39 (1996).

agujero negro) sobre la que cae la materia procedente de la otra estrella. Desde que se postuló la existencia de estrellas de neutrones por Walter Baade y Fritz Zwicky -en 1934- y la de los agujeros negros por el soviético Lev Landau -en 1932- y Arthur Eddington -1935-, la mera existencia de estos objetos compactos era una pura especulación teórica hasta hace unas décadas, cuando la Astronomía X abrió al mundo observacional este tipo de objetos.

Tanto las estrellas de neutrones como los agujeros negros se cree que se forman como resultado de una explosión supernova en la que el núcleo de la estrella que explota, implosiona sobre sí mismo convirtiéndose en un objeto compacto. Una estrella de neutrones tiene una masa como la del Sol y sin embargo su tamaño es de sólo unos 10 kilómetros por lo que su interior, que consiste fundamentalmente en neutrones, tiene una densidad del orden de 100 millones de toneladas por cm^3 y la fuerza de la gravedad en su superficie es unos 100 mil millones de veces la de la Tierra. El límite de masa de la estrella de neutrones está comprendido en el rango 1,4-3,2 masas solares. Pero en aquellos casos en los que el núcleo de la estrella masiva está por encima del límite de la máxima masa de las estrellas de neutrones, la fuerza de la gravedad es tan fuerte, que la estructura superdensa de una estrella de neutrones no es suficiente para evitar el colapso. Durante el colapso

gravitatorio, el campo gravitacional va a ser cada vez más fuerte, de modo que va a llegar un momento en que nada puede escapar del objeto, ni tan siquiera la luz, que por ello recibe el nombre de agujero negro (término acuñado por el estadounidense John Wheeler en 1968).

La manera más clara en la que las estrellas de neutrones y los agujeros negros se manifiestan observacionalmente es precisamente como fuentes de radiación X. La mayor parte de las fuentes de rayos X que vemos en nuestra galaxia son realmente sistemas binarios formados por dos objetos que giran uno alrededor del otro con un periodo orbital de pocos días, e incluso horas. Estos sistemas binarios empezaron llamándose binarias de rayos X porque su existencia se descubrió en el rango que nos ocupa. Tal fue el caso de Sco X-1, descubierto en 1961 por medio de un cohete de sondeo (ver capítulo I).

En un sistema binario de rayos X, una de las componentes *suele* ser una estrella normal mientras que la otra es -siempre- una estrella de neutrones o un agujero negro. El movimiento observable de la estrella normal alrededor del centro de masas común permite la detección del objeto no visible, así como determinar su masa de forma bastante aproximada en el caso de que se puedan tomar espectros ópticos de gran calidad. Ello se logra en virtud de los cambios observados en las líneas espectrales que presentan corrimientos Doppler como efecto de dicho movimiento. Así, la radiación de un objeto que se aleje parecerá más enrojecida, mientras que si se acerca, será más azulada.

Existen dos tipos de sistemas binarios de rayos X: los sistemas masivos (HMXB, también del inglés *High-Mass X-ray Binary*), y los sistemas de baja masa (LMXB, del inglés *Low-Mass X-ray Binary*), según sea la masa de la estrella visible o «normal» que acompaña a la estrella compacta sobre la que cae materia. Cada tipo presenta en rayos X espectros diferenciados, y se distribuye de forma diferente en la Galaxia: las LMXBs (unas 140) se encuentran en todo el plano galáctico, pero las HMXBs (unas 30) aparecen más concentradas en torno al Centro Galáctico. A este grupo pertenecen las llamadas «binarias X del Bulbo Galáctico», como GX 5-1. En ambos casos, los periodos orbitales suelen ser cortos -de horas a pocos días- y, por tanto, las componentes se encuentran muy cerca una de la otra. En el rango óptico, se observan las estrellas compañeras de la fuente de rayos X, a las que se les suele denominar estrellas «normales» y éste es generalmente el origen de la clasificación de los sistemas. Mientras que las LMXBs se caracterizan por una estrella de masa aproximadamente solar (tipos espectrales más tardíos que A) acompañada de un objeto compacto, las HMXBs contienen un objeto compacto alimentado por una estrella más masiva, de tipo O o B, de 10 a 40 veces la masa del Sol. Las HMXBs se pueden dividir en: supergigantes (SXB, del anglosajón *Supergiant X-ray Binary*) «estándares», con clases de luminosidad I-II) y sistemas Be (fuentes esporádicas, con clases de luminosidad III-V). A su vez, las SXBs se subdividen en SXBs de baja luminosidad X ($L_X \sim 10^{36}$ erg/s) y SXBs de alta luminosidad ($L_X \sim 10^{37-38}$ erg/s).

En el caso de las LMXBs en los que el objeto compacto es una estrella de neutrones con un campo magnético moderado -la gran mayoría- o un agujero negro, el mecanismo de emisión de rayos X es el siguiente: el gas de las capas exteriores de la estrella normal es atraído hacia la compañera compacta y acelerado por su intenso campo gravitacional. Como resultado, el gas que rodea a la estrella compacta va cayendo en espiral sobre ella, y va formándose el disco de acrecimiento. En su caída espiral, parecida a la del agua que cae por un desagüe, la materia se comprime y calienta a altas temperaturas, del orden de varias decenas de millones de grados, por lo que emite -en las zonas más internas del disco- radiación de alta energía que es observada en forma de rayos X, en tanto que una fracción de la anterior es reprocesada en las partes más externas del mismo, dando lugar a un espectacular aumento de la luz visible.

CUADRO IX. PROCESOS DE ACRECIMIENTO DE MATERIA SOBRE OBJETOS COMPACTOS

¿Es realmente importante el acrecimiento de materia sobre un objeto en cuanto a la producción de energía se refiere? Para un objeto de masa M y radio R_* , la energía potencial gravitacional que se libera debido al acrecimiento de una masa m es:

$$\Delta E_{\text{pot}} = \frac{GMm}{R_*}$$

donde G es la constante de gravitación universal. Por ejemplo, la caída (acrecimiento) de un cometa como el Halley sobre la Tierra, liberaría una energía de $7 \times 10^{21} J$ (equivalente a 8 millones de bombas atómicas como la de Hiroshima). El mismo cometa, sobre el Sol, produciría $2 \times 10^{25} J$ (ó $2 \times 10^{15} \text{ erg}$ por g de materia caída). Este valor es 20 veces superior al obtenido en la fusión nuclear de 1 átomo de Hidrógeno. Y en el caso de una estrella de neutrones típica ($M \sim 1 M_\odot$ y $R \sim 10 \text{ km}$), se liberarían $1.5 \times 10^{35} J$ (ó 10^{20} erg por g), 50.000 veces más que en el caso del Sol. Así pues, el mecanismo más poderoso para producir una gran cantidad de energía es cuando la materia se agrega sobre un objeto compacto.

Si el acrecimiento viene dado por $\dot{M} (g s^{-1})$, la *luminosidad* producida en el proceso de acreción viene dada por

$$L_{\text{acc}} = \frac{GM \dot{M}}{R_*}$$

e introduciendo ζ (parámetro adimensional que caracterize a la efectividad del proceso de acrecimiento),

$$L_{\text{acc}} = \frac{GM \dot{M}}{R_*} = \zeta \dot{M} c^2$$

El *radio gravitacional* viene dado por

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}$$

con lo que la eficiencia $\zeta = R_g/2R_*$. Así, en el caso de una estrella de neutrones ($R_* = 10 \text{ km}$, $R_g = 3 \text{ km}$), $\zeta = 0.1$.

Por ejemplo, para una estrella normal que pierda materia a un ritmo de $10^{-5} M_\odot \text{ año}^{-1}$, y una estrella de neutrones capturando el 0.1 % de la misma ($6 \times 10^{17} \text{ g s}^{-1}$), $L_{acc} \sim 6 \times 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$.

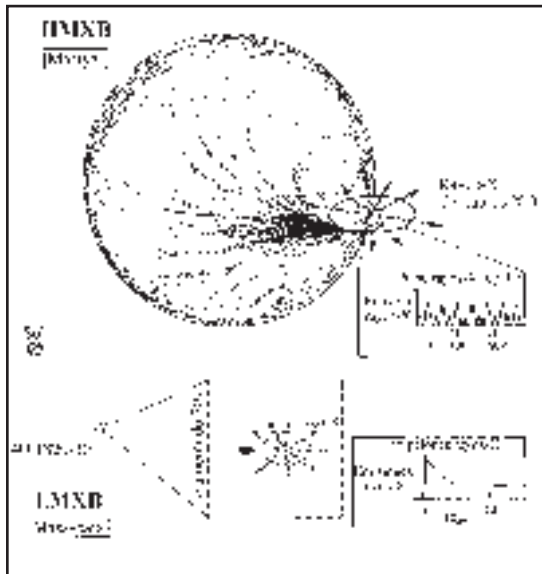
También es posible establecer un límite superior a la luminosidad de un objeto si la principal fuente de energía es el potencial gravitacional. Considerando el caso de acrecimiento esférico y asumiendo que el material que se agrega es un plasma totalmente ionizado dentro de una distancia r del centro, hay dos fuerzas actuando sobre él: de un lado la fuerza gravitacional, y de otro, la fuerza de sentido opuesto ejercida sobre los electrones por la presión de radiación. Entonces, se obtiene un valor crítico para la luminosidad que se conoce como *luminosidad límite de Eddington* y representa la luminosidad máxima posible en rayos X que es

$$L_{Edd} = 1.3 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ erg s}^{-1}$$

Para una estrella de neutrones típica ($1.4 M_\odot$), $L_{Edd} = 1.8 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$.

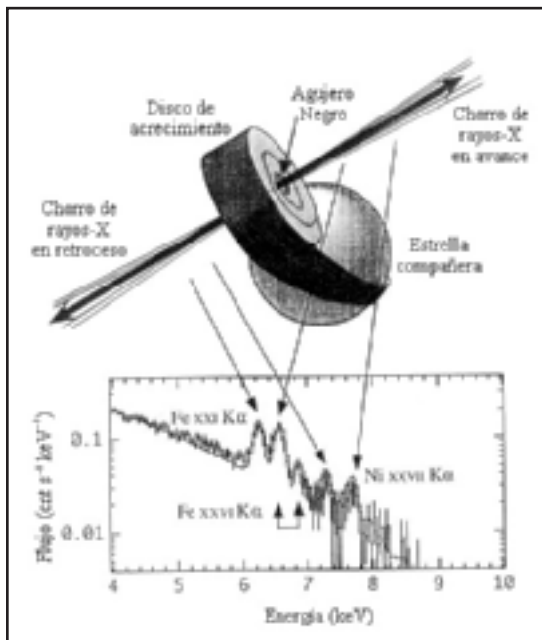
Los sistemas masivos (HMXBs) por el contrario, suelen estar dominados por la luz de la componente normal aunque en rayos X vuelve a ser protagonista el fuerte viento estelar de la gigante, que puede llegar a soltar al espacio 10^{-6} - 10^{-9} masas solares al año. Con la excepción de un sistema (Cyg X-1), el objeto compacto es una estrella de neutrones, normalmente con un intenso campo magnético ($\geq 10^{11}$ gauss). En este caso, el campo magnético bipolar impide que el gas se deposite en la superficie y aunque a veces se forma un disco de acrecimiento (lo que ocurre en las SXBs de alta luminosidad), la materia sólo se canaliza hacia los dos polos magnéticos donde se formarán regiones de 1 kilómetro de ancho a muy alta temperatura por el impacto del gas (figura 95). De esta forma, la rotación de la estrella de neutrones producirá un efecto de faro, que observamos como un púlsar de rayos X si la situación de la Tierra coincide con el plano sobre el que yace el eje de rotación del mismo. Es por ello por lo que se produce una modulación periódica del flujo de rayos X, a medida que los polos magnéticos aparecen y desaparecen de nuestra línea de visión conforme se produce el giro de la estrella de neutrones, de manera similar a cuando en la oscuridad de la noche nos alumbra intermitentemente un faro de nuestras costas. Eso fue precisamente lo observado por *Uhuru* en 1971, cuando se descubrió la emisión periódica de la HMXB llamada Cen X-3 (ver figura 18).

Fig. 95: En muchas HMXBs como Centaurus X-3, la materia fluye hacia los polos magnéticos de la estrella de neutrones. Sin embargo, en la mayoría de las LMXBs, lo hace a través del disco de acrecimiento. De E. van der Heuvel, en *Interacting Binaries*, Springer Verlag, Berlín, pág. 301 (1994).



Además, los sistemas binarios de rayos X presentan una gran variedad de comportamientos interesantes como consecuencia de la naturaleza ciertamente exótica de los objetos compactos que contienen. Uno de los más peculiares es SS 443 (figura 96). Naturalmente, las estrellas binarias de rayos X constituyen un laboratorio ideal para el estudio de mecanismos de transferencia de masa, proce-

Fig. 96: El sistema SS 433, en el que la estrella masiva (de tipo OB) orbita un agujero negro con un periodo de 13 días. Parte del material estelar se ve atraído hacia el agujero negro, formándose el disco de acrecimiento. Igualmente se ha constatado la presencia de dos chorros a través de los cuales la materia es expelida a velocidades del 25% de la luz. Ambos chorros precesan con un periodo de 164 días. Debajo se muestra un espectro tomado con Asca (SIS) en el que se ven claramente las líneas de emisión duplicadas por causa del efecto Doppler. El chorro que se acerca produce líneas de emisión desplazadas hacia el azul, y el chorro que se aleja produce las mismas líneas pero desplazadas hacia el rojo. Cortesía de los japoneses T. Kotani, N. Kawai y M. Matsuoka (1998).



sos de acrecimiento de materia sobre objetos compactos y vientos estelares. Las HMXBs son particularmente interesantes pues proporcionan información acerca de la pérdida de masa por vientos estelares o, en el caso de transferencia por el llenado de la configuración crítica de Roche como en el caso de Cyg X-1, pueden ser la clave para un mejor entendimiento de la física de los agujeros negros. Por otro lado, las LMXBs, en las que la transferencia de masa es siempre producida por el llenado del lóbulo de Roche, se puede estudiar el acrecimiento sobre estrellas de neutrones y agujeros negros, la estructura de los púlsares y las últimas etapas de la evolución estelar.

En 1985, el holandés Michiel van der Klis y colaboradores, por medio del satélite europeo *Exosat*, descubrieron la existencia de oscilaciones de carácter cuasiperiódicas (QPO) en GX 5-1, una fuente X cercana al centro galáctico (a 5° de longitud y -1° de latitud). A los pocos meses, una discusión teórica explicando dichas observaciones fueron publicadas (en una circular de la Unión Astronómica Internacional! (supuestamente, las circulares se usan para alertar a los observatorios del descubrimiento de cometas, novas, etc.). Como se vería más tarde, las oscilaciones resultaron ser comunes en LMXBs con frecuencias del orden de 5 a 60 Hz y persistencia durante más de 10^5 ciclos orbitales. Un claro ejemplo lo representa el caso de Sco X-1 que sufre grandes cambios en forma de oscilaciones cuasiperiódicas. Hoy día parece ser que el comportamiento de las QPO tiene tres formas según la localización de cada fuente concreta en el diagrama color-color. Este tipo de diagramas (ver figura 97), fue introducido por el alemán Günter Hasinger en 1988 para entender las variaciones espectrales. Según éstos, las fuentes se clasifican en «fuentes Z» y «fuentes atolón». Las de tipo Z, siguen un patrón con la forma

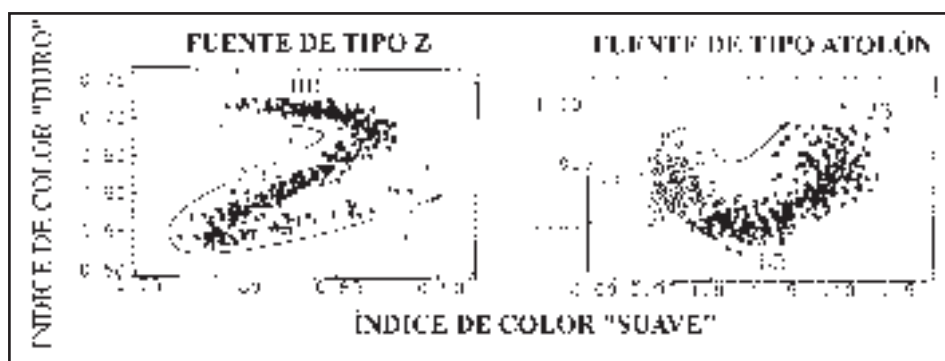
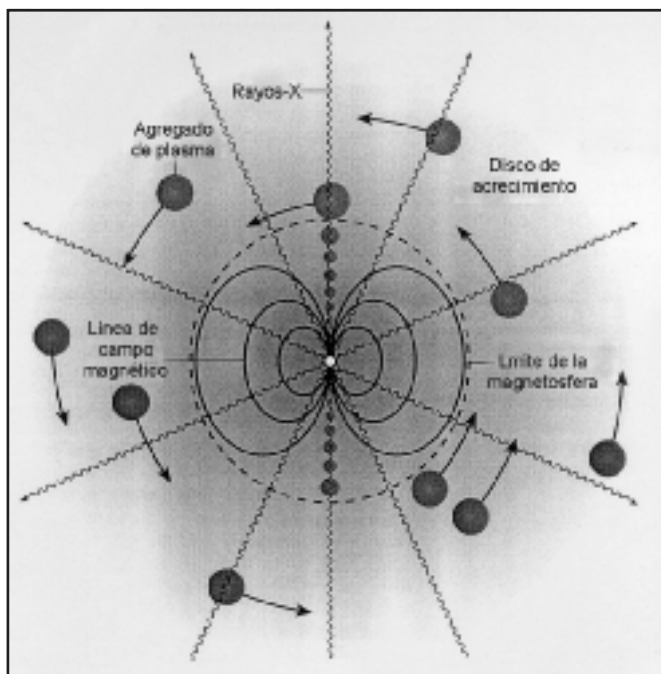


Fig. 97: Los diagramas color-color representan cocientes de flujos entre dos bandas de energía distintas. Algunas fuentes X presentan el patrón en forma de Z (fuentes Z), y otras, el de una curva más o menos cerrada (fuentes atolón). La flecha indica la evolución temporal. De G. Hasinger and M. van der Klis, *Astronomy and Astrophysics*, 225, *The European Physical Society, Les Editions de Physique, Les Ulis*, pág. 79 (1989).

de la última letra del abecedario, mientras que en el caso de las de tipo atolón, se sigue una curva más o menos cerrada. Según el modelo más aceptado (de Ali Alpar, Fred Lamb, Jacob Shaham y Noriaki Shibasaki), las pulsaciones que tienen lugar durante los ritmos de acrecimiento más modestos pueden deberse a la frecuencia de batido producida como diferencia de dos frecuencias: la frecuencia de rotación (a velocidad kepleriana), en el borde más interno del disco de acrecimiento y la frecuencia de rotación de la magnetosfera de la estrella de neutrones, a través de la cual caen los agregados de gas (figura 98). A ritmos de acrecimiento muy altos, próximos a la luminosidad máxima (el límite de Eddington), las pulsaciones podrían ser causadas por oscilaciones en el flujo de acrecimiento. Naturalmente, el diagrama en forma de Z de la gráfica color-color, representa sencillamente el ritmo de transferencia de masa que tiene lugar en el sistema particular. El origen de las QPOs no está claro, pero podría atribuirse a inhomogeneidades en el material que gira alrededor de la estrella de neutrones en un disco de acrecimiento. Satélites posteriores han contribuido a la caracterización de este tipo de oscilaciones en la emisión de rayos X. El satélite *Hakucho*, a principios de los ochenta, permitió detectar mediante seguimientos de larga duración de púlsares de rayos X, la forma complicada de las variaciones de flujo y sus periodos de pulsación. De hecho, varios años antes que la misión *Exosat* descubriera el fenómeno de las QPOs en los sistemas masivos de rayos X, *Hakucho* encontró un comportamiento similar con

Fig. 98: El modelo de frecuencia de batido en las oscilaciones cuasi-periódicas. El acrecimiento de los agregados de plasma tiene lugar cuando éstos, en su rápida rotación alrededor de la estrella de neutrones, se sitúan sobre alguno de los dos polos. La frecuencia observada es la diferencia entre la frecuencia de rotación del borde más interno del disco de acrecimiento y la frecuencia de la magnetosfera (la de la rotación de la propia estrella de neutrones).

Adaptado de M. Van der Klis, *Scientific American*, Nueva York (Nov 1988) pág. 36



frecuencias de 2 Hz en las erupciones de larga duración de una fuente conocida con el nombre «Ultrarrápida» por la gran cantidad de erupciones que presenta en intervalos de tiempo cortos, como veremos en la página siguiente. Con *Ginga*, se detectaron definitivamente QPOs este objeto. Pero sin duda, ha sido *RXTE* quien ha proporcionado datos fundamentales al respecto, gracias a su suprema resolución temporal. Por ejemplo, la observación de Sco X-1 ha permitido detectar QPOs de hasta 1,1 kHz, las más altas nunca detectadas para una binaria X. Podrían deberse bien a la frecuencia de rotación del gas en el borde más interno del disco, o bien a la ya mencionada frecuencia de batido.

Una cuestión igualmente importante es el origen y evolución de las binarias de rayos X. Las LMXBs se admite que son el resultado de la evolución de sistemas binarios cercanos, aunque menos masivos que en el caso de las SXBs. Una vez que la componente más masiva ha dejado tras de sí una estrella de neutrones tras sufrir una explosión supernova, la compañera -una estrella subgigante y vieja-, va a ir perdiendo sus capas externas como consecuencia del acrecimiento por parte de su insaciable compañero, hasta llegar a un punto en el que sólo va a dejar el núcleo desnudo de helio (ya enana blanca). Es lo que hoy en día observamos en 4U 1820-30. Conforme se va produciendo el acrecimiento de materia, la estrella de neutrones se va acelerando más y más, hasta que al final nos encontramos con un púlsar de milisegundos que emite pulsos de radioondas, pero ya no de rayos X.

Por lo que concierne a las SXBs, es comúnmente aceptado que éstas son el resultado de la evolución de sistemas binarios masivos con componentes de unas 15 y 10 masas solares respectivamente. Como consecuencia de la evolución más rápida de la componente más masiva, ésta va a dar origen a una explosión supernova que deja como resultado un objeto compacto, probablemente una estrella de neutrones. Aunque parece lógico pensar que el sistema no sobreviviría a un cataclismo de este tipo, el holandés Adriaan Blaauw (quién sería a la postre el primer director del Observatorio Austral Europeo o ESO) demostró en 1961 que el sistema se rompe sólo en el caso de que más de la mitad de la masa total sea expelida durante la explosión, lo que se ha demostrado para HD 77581 (Vela X-1), que se desplaza a 90 km/s como resultado de una explosión supernova que afectó a su compañera hace 2,5 millones de años. Pero prueba de que no siempre ocurre esto, es que observamos SXBs en las que tanto la estrella de neutrones como la compañera masiva han resistido al cataclismo. Es el caso de Cen X-3. La compañera seguirá su curso evolutivo, y al cabo de varios millones de años, podrá acabar su vida bien como enana blanca o también como supernova. En este último supuesto, y si el sistema logra sobreponerse a esta nueva explosión, tendremos uno de los raros púlsares binarios, ya sólo detectables en radio como consecuencia de la emisión sincrotón. Es el caso de PSR 1553+29, por cuyo descubrimiento recibieron los estadounidenses John Hulse y Joseph Taylor el Nobel de Física en 1993.

4.6.3. Erupciones de rayos X

Las erupciones de rayos X (o *X-ray bursts* en inglés) fueron descubiertas en diciembre de 1975 de manera independiente tanto por el norteamericano Josh Grindlay y el holandés John Heise como por los americanos R. Belian, W. Conner y R. Evans. Los flashes -con duración de varios segundos, figura 23- fueron observados repetidamente en la constelación de Norma (la Escuadra), a 330° de longitud galáctica. Pronto advirtieron que la posición de los mismos coincidía con una fuente X conocida, asociada al cúmulo globular NGC 6624 (figura 99).

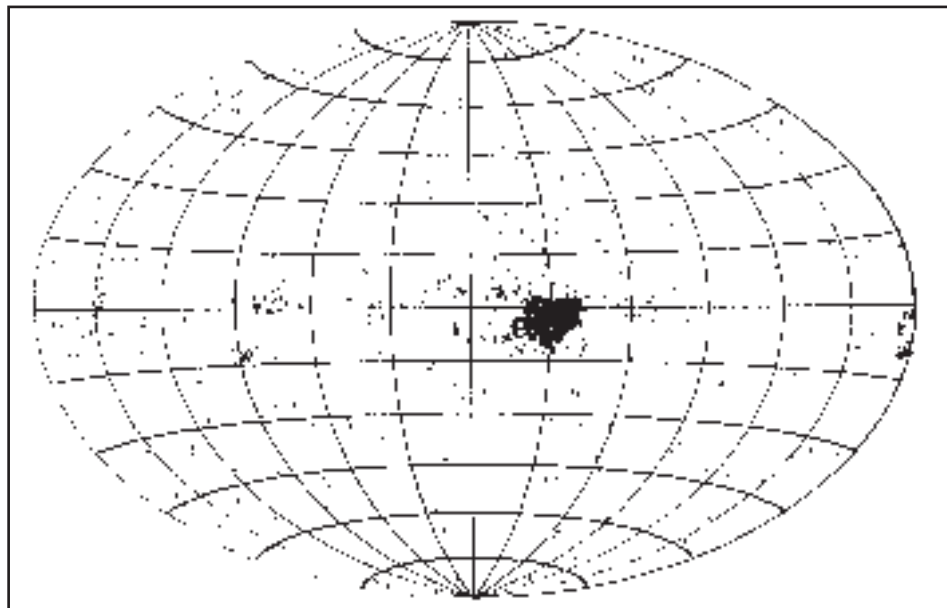
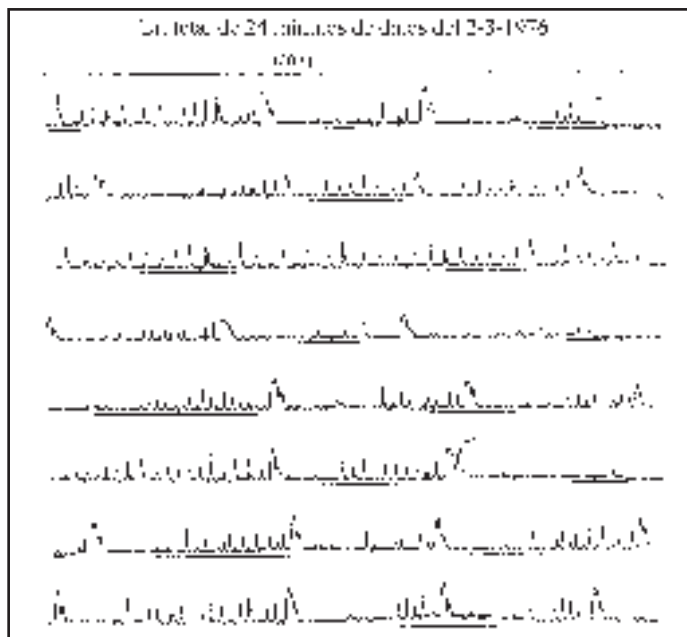


Fig. 99: El descubrimiento de los flashes de rayos X, en las observaciones de Vela 5B entre mayo de 1969 y agosto de 1970. De R. Belian y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 207, *The American Astronomical Society, The University of Chicago Press*, L33 (1976).

Con el tiempo, nuevos flashes X fueron apareciendo en otros cúmulos globulares, hasta tal punto de que se llegó a pensar que ¡todos los flashes eran inherentes a los propios cúmulos! Hoy sabemos que no es así, pero tal correlación era en cierto modo, lógica, pues los cúmulos globulares albergan a decenas de miles de estrellas y dada la edad de éstos -ya que se encuentran entre los objetos más viejos de la Galaxia-, parece posible que alguno de los sistemas binarios cercanos al centro de los cúmulos haya evolucionado dando lugar a una binaria de rayos X. No en vano, un cúmulo globular se descubrió al intentar identificar una de las fuentes eruptivas: el hoy conocido como Grindlay 1.

Un paso importante se dio en 1976 cuando los estadounidenses Jeffrey Hoffman (astronauta hoy día), Frank Marshall y el holandés Walter Lewin descubrieron que la ya mencionada fuente ultrarrápida (el *Rapid Burster*) producía dos tipos de explosiones, que llamaron «de tipo I» y «tipo II» (obviamente). El ritmo era nada

Fig. 100: Sucesivas explosiones de la fuente ultrarrápida X1730-335 (el Rapid Burster), en el cúmulo globular Liller 1. De W. Lewin, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 302, pág 210 (1977).



menos que de unos 1.000 por día. Ver figura 100. La diferencia entre ambos tipos radica en que los de tipo I se producen a intervalos de horas e incluso días, mientras que los segundos se llegan a producir en cuestión de segundos o minutos. El hecho de que las erupciones de rayos X estaban relacionadas con binarias de rayos X (LMXBs en particular) empezaba a quedar claro cuando Jeffrey McClintock identificó la contrapartida óptica de 4U 1735-44, presentando unas características muy similares a Sco X-1, el prototipo de las LMXBs como ya sabemos. Fue también precisamente en este caso cuando se observó una erupción simultánea tanto en X como en óptico, dentro de la campaña de observación de dicha fuente en 1978. Ver un ejemplo en la figura 101. La relación erupciones X-LMXBs quedó patente a principios de los 80 cuando se observó tal fenómeno en la LMXB Cen X-4. Hoy en día se conocen algo más de 40 fuentes eruptivas de rayos X (un 30 % de las LMXBs).

Por lo que respecta a la física de estas fuentes eruptivas de rayos X de tipo I, el satélite japonés *Hakucho* proporcionó las primeras informaciones acerca de la naturaleza física de estos sucesos violentos. Las observaciones indicaron la constancia del radio correspondiente a la radiación de cuerpo negro emitida durante erupciones de perfiles y tamaños muy diferentes. Esto es una evidencia más para suponer que toda la superficie de la estrella de neutrones se encuentra involucrada en el proceso de las erupciones de rayos X. El mismo satélite, sin embargo, obtuvo algunos datos acerca de la posible discrepancia entre los fenómenos eruptivos y el modelo clásico de erupción termonuclear. En dos fuentes se encontraron erupciones separadas por sólo 8-10 minutos y en la fuente ultrarrápida se detectaron fases de

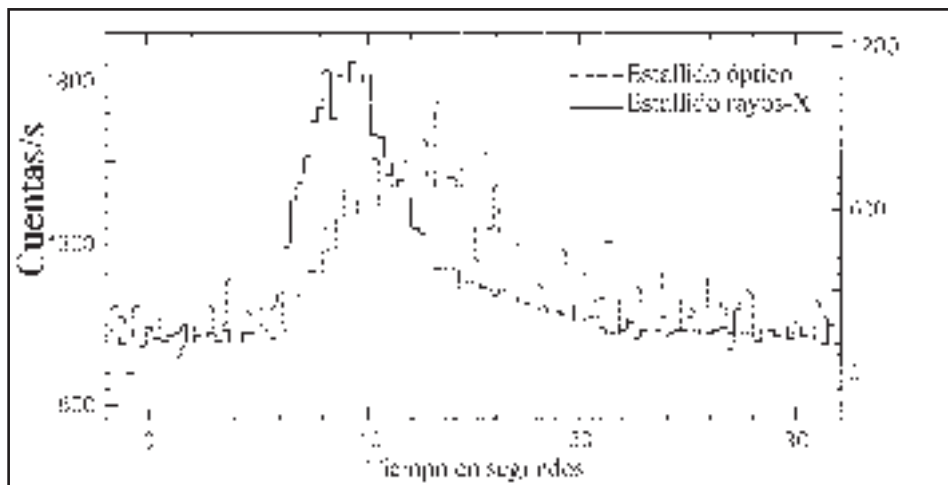


Fig. 101: Erupciones simultáneas tanto en X como en óptico provenientes de 4U 1636-536. En general, el cociente de fluencias (flujo integrado en tiempo) es $S_{\text{opt}}/S_x \sim 10^{-5}$. De Joachim Trümper y colaboradores, Space Sciences Review 40, Kluwer Publishers, Dordrecht, pág. 255 (1985).

máximo durante algunas erupciones de hasta doce minutos. Estos resultados no hacían más que confirmar medidas anteriores con el SAS-3. También se descubrió que la luminosidad de las fuentes eruptivas en el entorno del centro galáctico era excepcionalmente alta, incluso superior al límite de Eddington para la distancia de 30.000 años-luz a que se suponía entonces que se encontraba el centro de la galaxia (hoy consideramos que está a 28.000 años-luz de nosotros). Actualmente está aceptado que las erupciones de tipo I se deben a reacciones termonucleares como consecuencias de inestabilidades en las capas superiores de estrellas de neutrones con campos magnéticos más bien débiles (10^{10-11} gauss). Ello se produce tras haberse depositado hidrógeno y helio provenientes de la estrella compañera. La alta presión producida por el peso de esta materia conlleva su fusión para dar lugar a núcleos de hierro y, eventualmente a neutrones para densidades mayores que 10^{11} g/cm³. Este proceso de fusión puede dar lugar en este caso a una serie de inestabilidades y la energía nuclear liberada ser transportada a la superficie originando la erupción X. Por lo que respecta a las erupciones de tipo II, la idea es que se producen como inestabilidades en el disco de acrecimiento que rodea a la estrella de neutrones. Ocasionalmente, las partes más internas del disco de acrecimiento se desploman (literalmente) sobre la estrella de neutrones, originando la erupción de tipo II.

Aquí se podría citar el caso de la erupción X detectada en 1993 por *Asca* en simultaneidad a la explosión en rayos gamma suaves de la fuente SGR 1806-20, ya descubierta en 1979 por KONUS en las *Venera*. La detección en X permitió relacionar sin lugar a dudas dicho objeto con una estrella de neutrones de fuerte campo magnético ($\sim 10^{14}$ gauss) en el corazón de un residuo de supernova bien conocido en radio.

4.6.4. Fuentes transitorias de rayos X

En las binarias de rayos X, la transferencia de masa no suele ser un proceso completamente estable. Una veces de forma cuasi-periódica y otras veces de manera totalmente irregular, se producen erupciones en los discos de acrecimiento, debidos bien a un incremento en el ritmo de la transferencia de masa (desequilibrios hidrostáticos de la estrella compañera), o bien por inhomogeneidades en el propio disco. En aquellos casos en los que por un periodo de tiempo considerable (de días hasta meses) se detecta un aumento extraordinario del flujo de rayos X donde antes no existía ninguna fuente detectable, decimos que ha aparecido una fuente transitoria o esporádica (del inglés *X-ray Transient*). Este hecho, que no es muy normal, ocurre por término medio una vez cada 3 años en el caso de fuentes muy brillantes, siendo que en esos momentos, la nueva fuente rivaliza con el mismísimo Sco X-1 -la fuente más brillante del cielo en rayos X, con excepción del Sol en los máximos solares- e incluso puede llegar a superarla.

El aumento del flujo -no sólo en rayos X sino también en rayos γ -, generado en el disco de acrecimiento, lleva paralelo un aumento del flujo en las longitudes de onda del ultravioleta y óptico, como consecuencia del reprocesado de los rayos X en las partes más externas del disco por efecto Compton («comptonización»). Es por ello por lo que si este hecho se produce en una LMXB, tendremos un aumento muy considerable en el óptico, de hasta 10 magnitudes, lo que les vale el nombre de «Novas de rayos X». El nombre no es el más apropiado, pues la física del sistema no tiene mucho que ver con las novas clásicas, pero sí es muy intuitivo... En otros casos, el aumento de brillo sólo se registra en X (con frecuencia se trata de emisión pulsada), y apenas se percibe en el óptico. En estos casos la fuente transitoria se relaciona con una estrella masiva del tipo Be (HMXB), pues es la estrella gigante la que continúa dominando la emisión óptica del sistema. Forman una considerable fracción de los púlsares de rayos X, pero también el periodo de actividad es más efímero que en las Novas de rayos-X.

La primera Nova de rayos X fue detectada en abril de 1967 por J.R. Harries y colaboradores, quienes utilizaron contadores proporcionales a bordo de dos cohetes del tipo *Skylark*, que fueron lanzados desde Woomera, Australia. La fuente, que rivalizaba con Sco X-1, fue encontrada en el límite de las constelaciones de la Cruz del Sur y de Centauro, por lo que inicialmente fue bautizada con Crux X-1, pero que más tarde sería denominada Centaurus XR-2 (= Cen X-2) al conocerse mejor la posición del objeto. ¡Lástima por los australianos, tan ilusionados al llevar igualmente la constelación de la Cruz del Sur reflejada en su bandera! Meses después ya se vio que el objeto había ido desapareciendo en el cielo X, y fue G. Chodil quien sugirió el término Nova ya reseñado, al asociar su comportamiento en el óptico (¡sólo en el óptico!) con el observado en las novas normales.

El turno siguiente le tocó a Cen X-4 (una estrella de neutrones) en 1969, que reapareció a los diez años. Pero Cen X-4 no fue tan espectacular como la que *Ariel-5* descubrió en 1975, llamada A 0620-00. Su aumento de intensidad en rayos X fue

TABLA 1. LOS MÁS FIRMES CANDIDATOS A AGUJERO NEGRO.

Nombre	Otros	mag (V)	Tipo	Distancia (años-luz)	P (días)	M _x (M _☉)
Cygnus X-1	HDE 226868	9	HMXB	8.000	5,6	10-15
LMC X-3	-	17	HMXB	175.000	1,7	4-11
LMC X-1	-	14	HMXB	175.000	4,2	4-10
A 0620-00	V616 Mon	18	LMXB	3.000	0,32	3,3-4,2
H 1705+25	Nova Oph 77	21	LMXB	10.000	0,70	4,1
GS 2000+25	Nova Vul 88	22	LMXB	8.000	0,34	5,3-8,2
GS 2023+338	V404 Cyg	18	LMXB	11.000	6,47	8-15
GRS 1124+68	Nova Mus 91	20	LMXB	10.000	0,43	4-6
GRO J0422+32	Nova Per 92	22	LMXB	5.000	0,21	4,5
GRO J1655-40	Nova Sco 94	17	LMXB	10.000	2,61	4-5,2

Notas: A 0620-00 también recibe el nombre de Nova Monocerotis 1975, al igual que GS 2023+338 (Nova Cygni 1989). GRO J0422+32 ha sido designada como V518 Per. M_x (en masa solares M_☉) es la masa estimada para el agujero negro.

enorme (fig. 26), siendo que en dicho año se convirtió en el objeto más brillante del cielo en rayos X y desapareció después de varios meses.

Precisamente dentro de este grupo de Novas de rayos X -la llamada *mina de oro* según la ha bautizado el español Jorge Casares- es donde se enclavan los más firmes candidatos a agujero negro (excepto Cyg X-1 y las dos fuentes de la Gran Nube de Magallanes). Ver Tabla 1.

CUADRO X. LA FUNCIÓN DE MASA

Aunque a priori, no hay posibilidad de distinguir si en la Nova de rayos-X el objeto compacto es una estrella de neutrones o agujero negro, el estudio espectrofotométrico del sistema en el óptico una vez el mismo haya retornado a su estado inicial («de reposo»), va a permitir determinar la llamada función de masa X del sistema:

$$F_x(M_x, M_c, i) = \frac{M_c^3 \sin^3 i}{(M_x + M_c)^2} = \frac{P v_1^3}{2\pi G}$$

donde M_c es la masa de la compañera, M_x la masa del objeto compacto e i la inclinación del sistema con respecto a nuestra línea de visión. P es el periodo orbital del sistema y v_1 la velocidad radial de la estrella compañera alrededor del centro de masas del sistema. Tanto P como i y v_1 son observables. P e v_1 se obtienen por medio de un estudio fotométrico, y v_1 a través de la obtención de espectros de la secundaria. El semieje mayor de la órbita, a_1 , también se puede obtener acto seguido ya que $a_1 = P v_1 / 2\pi \sin i$.

Al estudiar un número suficientemente representativo de binarias de rayos X con posibles agujeros negros, los investigadores del grupo de trabajo de *Ginga*, sugirieron que la forma del continuo de radiación X emitida por las fuentes permite distinguir aquéllas que contienen una estrella de neutrones de las que realmente acogen a un agujero negro. En particular, los sistemas con agujero negro muestran un cambio de pendiente a partir de 10 keV, una cola o exceso de radiación, que no se observa en los que albergan una estrella de neutrones. Pero la cosa no es tan sencilla... Además, los cálculos estadísticos han proporcionado indicaciones de que la mayor parte de los agujeros negros (unos 500 en la Galaxia) deben encontrarse en sistemas binarios de baja masa, y no en sistemas masivos, como se creía anteriormente en virtud de la existencia de Cyg X-1.

El monitor de todo el cielo del satélite *Ginga* descubrió dos fuentes transitorias, una de ellas con fuerte parecido en su espectro a A 0620-00, un sistema binario de rayos X que es un candidato idóneo de agujero negro. Uno de ellos es GS 2023+338, y observaciones en el óptico realizadas por Casares y colaboradores, han demostrado que el objeto compacto del sistema es uno de los más firmes candidatos a agujero negro, con una masa no inferior a 8 veces la masa del Sol.

A principios de 1991, los daneses Niels Lund y Søren Brandt descubrieron la explosión de otra nova X en la constelación de la Mosca, en el hemisferio sur, mediante el monitor de rayos X WATCH, a bordo del observatorio ruso *Granat*. A los pocos días, GRS 1124-68 (=Nova Muscae 1991) fue identificada mediante telescopios terrestres en el rango óptico así como la estrella progenitora, inspeccionando imágenes más antiguas de la misma región. Lo interesante es que se conocen pocas estrellas de este tipo, pues sólo ocho se han detectado desde 1975, y además, ninguna anteriormente había sido observada tan rápidamente después de la explosión, gracias a WATCH. Fue este detector el que refinó la posición de la siguiente nova X, GRO J0422+32 (cuadro XI), aparecida en 1992 permitiendo descubrir la contrapartida óptica el mismo día que en rayos X energía en el cielo la extraordinariamente fuente GRS 1915+105 (cuadro XII).

CUADRO XI. GRO J0422+32/NOVA PERSEI

Evpatoria es una ciudad situada en las orillas del Mar Negro, en la Península de Crimea y perteneciente, a su vez, a la República de Ucrania. En 1992, el segundo autor de este libro, acompañado de su esposa, se encontraba allí realizando parte de su tesis doctoral. La misión era ir todos los días a la Estación Espacial situada a diez kilómetros de la ciudad a recoger y, posteriormente, analizar los datos que nos proporcionaba el instrumento danés WATCH, a bordo del satélite soviético *Granat*. Estos datos eran recogidos a través de la antena de 60 metros de diámetro, que se ubica en dicha base. Cada día aguardábamos al pequeño autobús que nos recogía y llevaba a la Estación Espacial. Una vez allí, esperábamos con interés el momento de la recogida de datos y,

más aún, el de su análisis. Durante este tiempo éramos los responsables de que la recepción de los datos que nos llegaba de WATCH se llevara a cabo con éxito, al igual que como su análisis posterior.

Así es como algunos días podíamos detectar algo en el Universo, como una explosión cósmica de rayos- γ o como alguna nueva fuente de rayos-X. En ambos casos, tratábamos de localizar su posición en el cielo y comunicár su descubrimiento a la Unión Astronómica Internacional. Por entonces, ya sabíamos que el día 5 de agosto había aparecido una fuente nueva en el Espacio, denominada GRO J0422 + 32, según había anunciado el norteamericano Bill Paciesas, del equipo científico de BATSE (figura 67).

Cuando el 13 de agosto nos encontrábamos en la Estación Espacial de Evpatoria, recogimos los datos que nos llegaron de WATCH y seguidamente comenzamos a analizarlos. Detectamos algo interesante y, después de un cuidadoso análisis, llegamos a la conclusión de que era una fuente nueva; aquella que había aparecido días atrás. La contrapartida óptica estaba aún sin identificar, y era fundamental hallarla. De esta manera, nada más terminar la sesión en la Estación, nos dirigimos hacia Nauchny, el Observatorio de Crimea, sin previo aviso (por lo que no sabíamos si nos darían permiso para utilizar el telescopio e intentar encontrar la fuente). A 150 kms de Evpatoria, Nauchny, que significa «científico», se encuentra en pleno corazón de Crimea, muy cerca de la capital - Simferopol - y pertenece a la comarca de Bakhchisarai. Situado en las montañas, a 600 metros de altura sobre el nivel del mar, el paisaje es muy original debido a la peculiaridad de sus montañas. Además, la zona goza de muchos años de historia, pues fue la capital del khanato turco, cuando este Pueblo dominó estas tierras (siglo XV). El Observatorio es actualmente una población autosuficiente, que cuenta con alrededor de 2.000 habitantes.

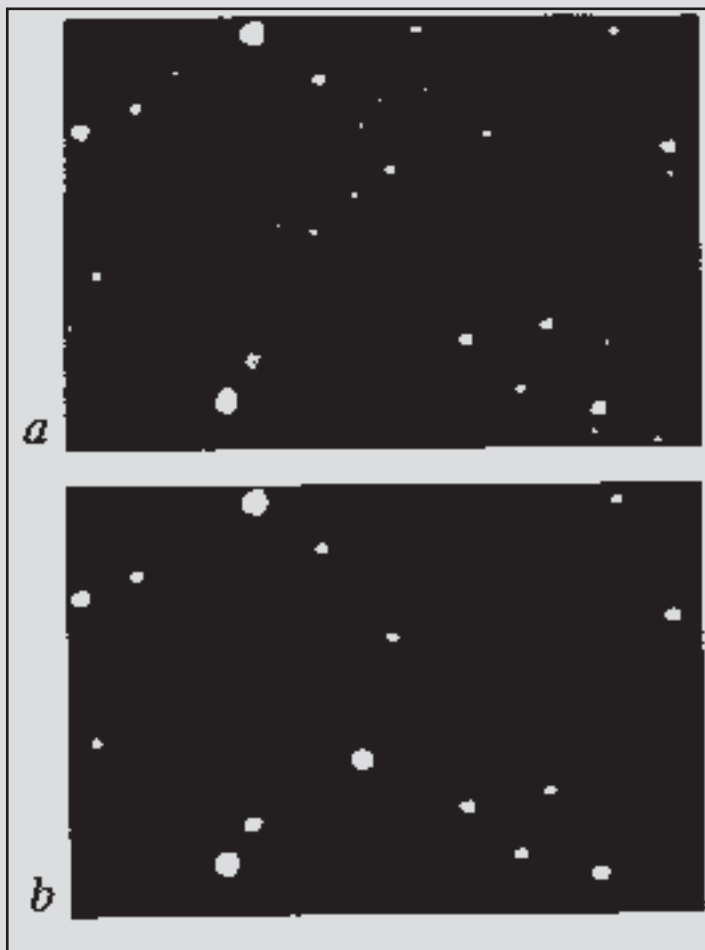
Una vez allí, y después de un largo camino para llegar, nos recibió el Profesor R. Gershberg, quien -tras su lógica sorpresa- nos abrió las puertas del observatorio. Así, conocimos a la astrofísica experimental Lena Pavlenko y a un joven astrofísico recién llegado de Nikolaev llamado Alexei Shlyapnikov, con quienes nos dirigimos al telescopio MTM-500 (Maskutov). Estábamos en una sala contigua al telescopio y recibíamos las imágenes a través de un monitor de televisión. Empezamos, de este modo, a analizar las mismas. Sabíamos que no iba a ser fácil, puesto que la zona de error proporcionada por WATCH era un círculo de 1° de diámetro, mientras que el campo del telescopio era de tan sólo $6'$, con lo que debíamos observar ¡nada menos que cien campos distintos! Además la Luna, casi Llena, se encontraba ya cerca de la zona de error. El método consistía en comparar uno a uno cada campo con el equivalente mostrado en la carta del Observatorio de Monte Palomar que teníamos como comparación. Pasaron varias horas, empezábamos a tener los ojos ya irritados debido al cuidadoso análisis; pero fuimos persistentes y, a las tres y veinte de la madrugada, cuando llevábamos examinados solamente diecisiete

campos de los cien, descubrimos una estrella muy azulada de magnitud 13 que no aparecía en las cartas de Monte Palomar (figura 102). ¡Allí estaba, en la constelación de Perseo!...

Contentos, al llegar las primeras luces del alba dejamos el telescopio, a la espera de poder obtener la noche siguiente un espectro con el gran telescopio *Shajn* de 2,6 m. No obstante, temprano esa misma mañana debíamos volver a Evpatoria para ir, como todos los días, a la Estación Espacial a recoger y analizar los nuevos datos. El esfuerzo merecía la pena, encontramos Nova Persei 1992 (Circular de la Unión Astronómica Internacional nº 5588) y, a partir de ahí se pudo seguir su evolución en todas las longitudes de onda (figura 103).

La contrapartida óptica mostró ser un sistema de tipo LMXB en el que una

Fig. 102: El descubrimiento en el óptico de la contrapartida de la nova de rayos X GRO J0422+32, Nova Persei 1992, el 15 de Agosto de 1992. a) En las imágenes obtenidas por el telescopio Schmidt del Monte Palomar en la década de los 50. b) En la imagen del MTM-500 en el momento de su descubrimiento (15 de Agosto de 1992).



estrella de tipo M2 y un objeto compacto orbitan con un periodo de 5,1 h. En Navidad de 1994, cuando el sistema regresó a la magnitud original (21), una serie de espectros ópticos fueron tomados por Jorge Casares junto con uno de los autores de este libro y otros astrofísicos. Los mismos permitieron calcular la función de masa X del sistema, que resultó $F_X = 0,85 \pm 0,40 M$, y teniendo en cuenta el valor de la inclinación del sistema, podemos deducir que la masa del objeto compacto está en el rango $2,5 \leq M \leq 3,4 M$, e incluso mayor, como confirmaron Alex Filippenko y colaboradores poco después, lo que implica que el objeto compacto es casi con toda seguridad un agujero negro. Tal como se había sospechado ya en 1992.

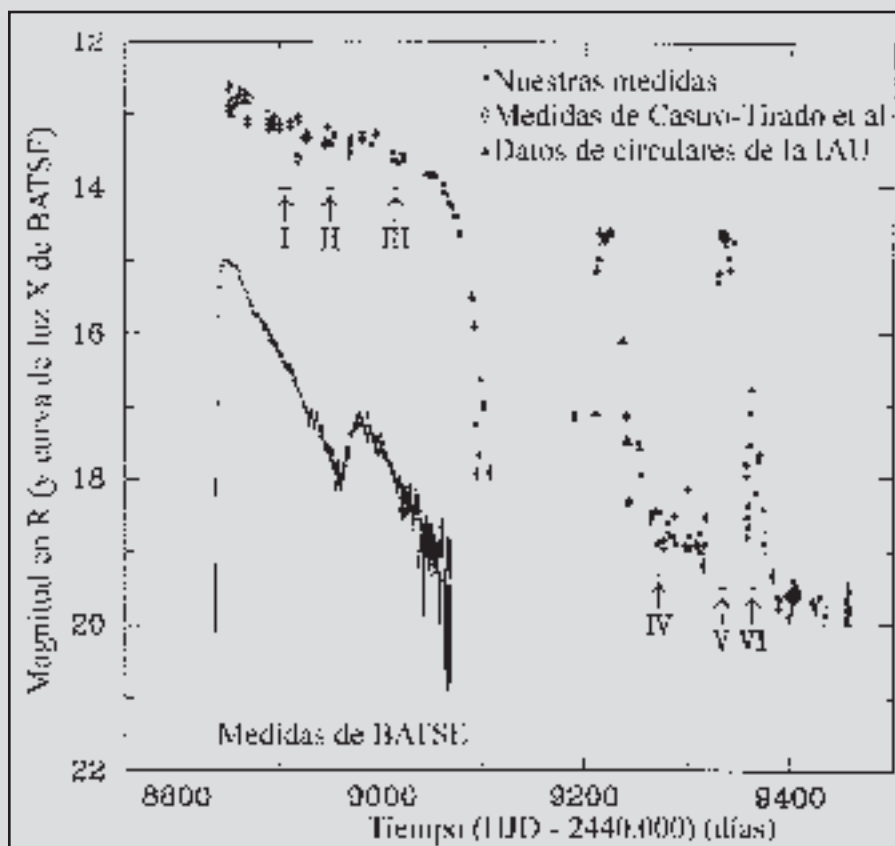


Fig. 103: Comparación entre las curvas de luz ópticas y X de GRO J0422+32/Nova Persei. De P. Callanan y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 441, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, pág. 788 (1995).

CUADRO XII. GRS 1915+105, ÚNICA EN LA GALAXIA

Crimea, 15 de agosto de 1992. Después de identificar desde Nauchny la contrapartida óptica de GRO J0422+32, regresamos -el segundo autor de este libro y su esposa- de nuevo a Evpatoria, a unos 100 km de distancia. Prácticamente sin haber dormido nada, nos dirigimos a la Estación Espacial desde donde se controlaba el satélite *Granat*. Allí nos esperarían los datos de la observación realizada el día anterior por WATCH, el monitor de rayos X que -como de costumbre- escudriñaba las 3/4 partes de la bóveda celeste en el rango de energías 8-80 keV. Serían sobre las tres de la tarde cuando obtuvimos los datos de WATCH. Acto seguido, hicimos un rápido y rutinario análisis, a fin de ver si se había producido alguna explosión cósmica de rayos gamma o bien si había aparecido alguna nueva fuente en el cielo X. Tan sólo bastaron algunos minutos para comprobar que una fuente desconocida rivalizaba con el mismo Cyg X-1, una de las fuentes más brillantes del cielo X. Rápidamente dimos la alerta a la comunidad internacional, siendo el nombre de la fuente -de acuerdo con la tradición usada por los astrónomos de altas energías-, GRS 1915+105 (GRS por *GRanat Source* y 1915+105 por sus coordenadas ecuatoriales). A pesar de la imprecisión en la posición dada por WATCH (1°), intentamos por todos los medios realizar una búsqueda tal como acabábamos de hacer exitosamente en el caso de GRO J0422+32, pero esta vez resultó infructuosa. Después de pasar algunos días nuevamente en el Observatorio de Crimea analizando minuciosamente los objetos situados dentro de la zona de error, llegamos a la conclusión de que la contrapartida debía de ser más débil que magnitud 18 (Nova Persei la encontramos en magnitud 13, después de haber aumentado de brillo en 9 magnitudes). El hecho de que GRS 1915+105 se situaba a sólo $0,2^\circ$ por debajo del Plano Galáctico reforzaba la idea de que el objeto se encontraría a bastante más distancia de nosotros que Nova Persei, y por ello su luz óptica más debilitada debido a la extinción interestelar. Fue ello lo que nos motivó a solicitar con insistencia una observación de urgencia por parte del principal instrumento de *Granat*: el telescopio de rayos gamma SIGMA (50-2000 keV). Finalmente, SIGMA pudo observar GRS 1915+105 unas 5 semanas después del descubrimiento por WATCH, detectándola claramente. Pudo determinar sus características espectrales y lo que es aún más importante: logró reducir la incertidumbre en la posición en un factor 20. El error en la nueva posición era ya de sólo $3'$ de radio. Ello sirvió para que se hicieran búsquedas más profundas en el óptico, pero los resultados serían siendo negativos.

Fue ya en diciembre de 1992 cuando una contrapartida en radio fue descubierta por el uruguayo-argentino-americano-francés Félix Mirabel (o ciudadano del mundo como el prefiere) y el mejicano Luis Felipe Rodríguez dentro de la zona de error proporcionada por SIGMA. El objeto mostraba una radioemisión

variable, lo cual no hacía sino confirmar su relación con GRS 1915+105. La posición de dicha fuente pudo ser determinada con una precisión de $0,5''$. Para entonces ya disponíamos nosotros de dos placas de $5^\circ \times 5^\circ$ tomadas en La Silla. Usando dichas placas, pudimos determinar con mucha precisión la posición de tal radiofuente entre las estrellas visibles en la imagen. Ello nos llevó a solicitar una observación en la banda I con el NOT en La Palma, pero en la imagen no aparecía ningún objeto en la posición de dicha radiofuente. Ya no quedaba más remedio que solicitar una observación infrarroja (IR) a toda costa. Sería la única forma de lograr «atravesar» nuestra Galaxia y ver más allá de la luz óptica (la absorción en el IR no es tan alta como en el visible). Así pues, por medio del telescopio UKIRT, obtuvimos 2 imágenes, usando los filtros J y K. Efectivamente, allí en la posición esperada estaba la contrapartida de GRS 1915+105 (figura 104). La absorción en el óptico es de 25 magnitudes.

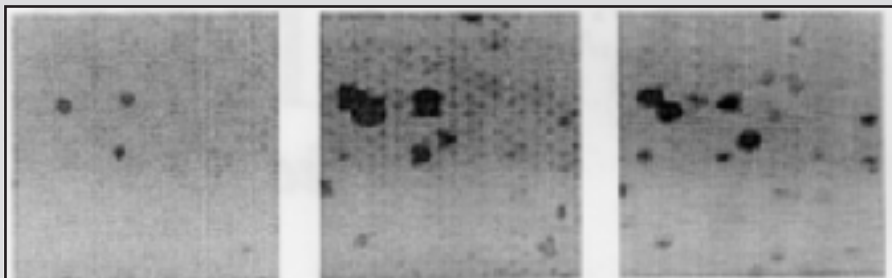
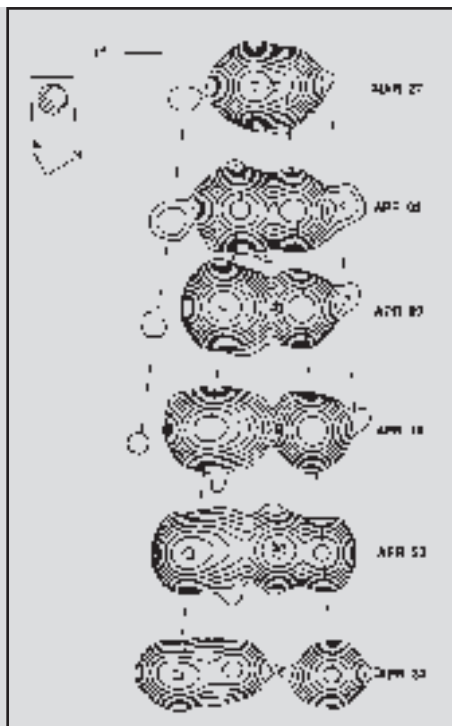


Fig. 104: La contrapartida IR de GRS 1915+105, el primer microcuásar de la Galaxia. En la banda I del óptico (9.000 Å), y en las J (12.000 Å) y K (22.000 Å) del infrarrojo cercano.

Ya desde un primer instante pudimos advertir que la fuente era bastante inusual. Su comportamiento en rayos X era totalmente distinto a cualquier otra fuente de las que habíamos detectado con WATCH. Sucesivos periodos de actividad parecían estar aconteciendo sin periodicidad alguna. Fue en uno de ellos, concretamente el detectado en marzo de 1994, cuando las observaciones en radio que Mirabel y Rodríguez venían efectuando semanalmente, mostraron dos condensaciones que -conforme pasaban los días-, se iban separando a velocidades aparentemente mayores que la de la luz (figura 105). Ello se interpretó acertadamente como que nubes de plasma estaban siendo despedidas en direcciones opuestas y con velocidades de 0,92 veces la velocidad de la luz (c), dando la impresión de ser velocidades mayores que c por causa de los efectos relativistas. Se ha calculado que la eyección de materia forma un ángulo de unos 70° con respecto a la visual, y que la masa que se expulsó en las condensaciones correspondería a $1/3$ la masa de la Luna.

Otro nuevo periodo de actividad se produjo en septiembre de 1994. Fue entonces cuando pudimos obtener, también por medio de UKIRT, un espectro en la banda K. Dicho espectro lo compararíamos con el obtenido un año

Fig. 105: Condensaciones de materia separándose en el dominio radio del objeto compacto en el sistema de GRS 1915+105, entre el 27 de marzo y el 30 de abril de 1994. De F. Mirabel y L. Rodríguez, Nature, 371, McMillan Publishing Company, Londres, pág. 46 (1994).



antes (septiembre de 1993), momento en que la fuente se encontraba en un mínimo de actividad. La diferencia era notoria, y líneas de emisión del H y He aparecían en el segundo espectro. Dichas líneas no presentan desplazamiento hacia el rojo, como en el caso de SS 433, y las características tampoco son las de Cyg X-3, cuya compañera es una Wolf-Rayet. GRS 1915+105 es muy probablemente, un sistema binario en el que un agujero negro está engulliendo materia de la estrella compañera. Las características observacionales en todas las longitudes de onda son tan parecidas a las de los cuásares (capítulo V) que se le considera a GRS 1915+105 como el primer «microcuasar» encontrando en nuestra galaxia. Aunque a distinta escala, los mismos fenómenos están ocurriendo en estos sistemas, pero con la gran ventaja para nosotros de que los que aprendemos con GRS 1915+105 en meses tardaríamos años en adquirirlo con cuasares.

4.7. El centro de la Galaxia

Se han llevado a cabo numerosos intentos para averiguar qué ocurre en el centro mismo de nuestra galaxia en numerosos rangos del espectro electromagnético. Pero precisamente en la zona de los rayos X duros, así como en el dominio de la radiación gamma, es donde se encuentra la mejor ventana de observación ya que estos fotones son los que pueden atravesar las densas nubes

de materia interestelar que oscurecen el centro de la galaxia. El Centro Galáctico (CG) ya fue observado por el grupo de Giacconi en 1965, cuando utilizando un cohete de sondeo, detectaron la fuente X situada en el CG, de nombre GCX (= Sagittarius X-1).

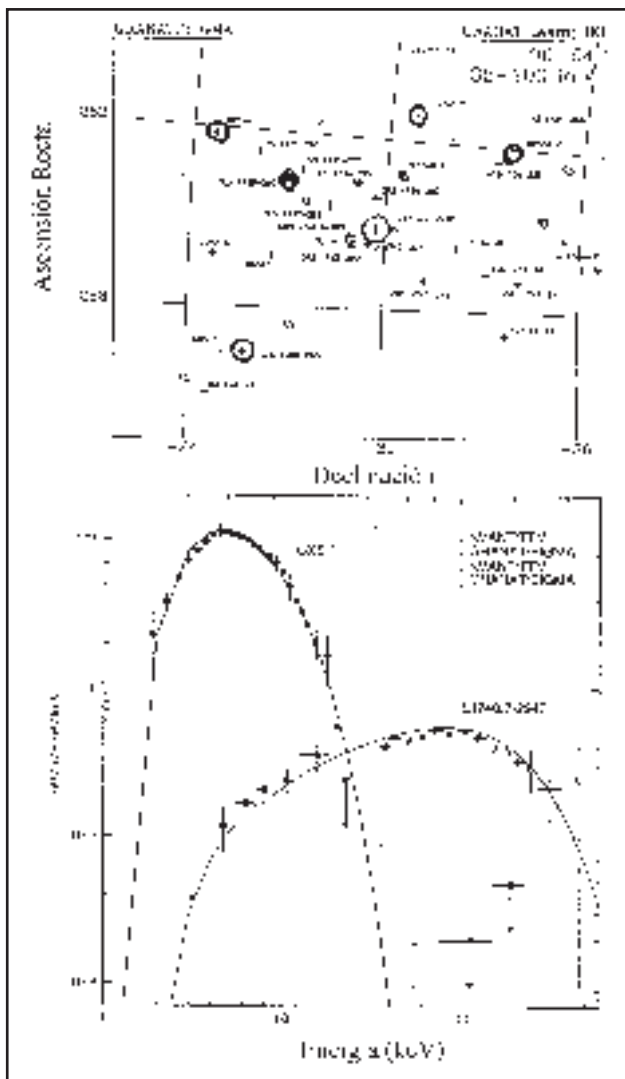
Las observaciones en rayos X fueron además fomentadas por el descubrimiento en 1972 de una línea espectral en rayos gamma, a 511 keV, correspondiente a la aniquilación de electrones y positrones en el campo de visión del centro galáctico. Aunque las medidas iniciales se hicieron con detectores sin capacidad de producir imágenes, aumentaron las especulaciones acerca de la existencia de un agujero negro masivo en el centro de la Galaxia. La línea ha sido observada varias veces, mostrando además, su carácter variable. Aunque está aceptado la existencia de un componente extenso probablemente debido al propio disco galáctico, no está claro si también puede haber una (o más) fuentes compactas responsables de la misma. En ese caso, todo apunta a que 1E 1740.7-2942 pudiera ser una de ellas, como veremos más adelante.

Ya en 1974, *Ariel-5* descubrió A1742-289, una nueva fuente de rayos X que llegó a ser la segunda masa brillante del cielo tras Sco X-1. Y poco después, el sistema de colimación modulada por rotación, incorporada al equipo instrumental del SAS-3, permitió la localización de otra fuente X (A 1742-294) a menos de 10" del CG, pero separada de la posición de máxima intensidad en ondas radio. Fue el satélite *Einstein* el que discernió, en un campo de $1^\circ \times 1^\circ$ alrededor del CG, entre una región de emisión difusa de $25' \times 15'$ y varias fuentes débiles de rayos X.

A mediados de los 80, las primeras imágenes obtenidas por medio de instrumentos en globo en el rango de energías entre 3 y 30 keV indicaron la existencia de emisiones débiles procedentes del CG dominadas por una fuente, situada a más de $45'$ del mismo, la ya reseñada 1E 1740.7-2942, que previamente había sido descubierta por el satélite *Einstein*. Este hecho se confirmaría por nuevos experimentos en globo (1990) y por las observaciones de *Granat*. Ésta es, con diferencia, la fuente X más enigmática del CG, como demostrarían observaciones radio posteriormente. También *Ginga* detectó una radiación intensa de rayos X procedente del centro de la galaxia con una línea de emisión típica del hierro a 6,7 keV. Por su parte, *Kvant* en la *Mir* descubrió nuevas fuentes. No en vano, el CG es la región de mayor variabilidad de nuestra galaxia, donde nuevos objetos van constantemente emergiendo y desapareciendo, como revelaron mejor que nadie los instrumentos a bordo de *Granat*.

El telescopio ART-P a bordo de *Granat* ha permitido observar los alrededores del CG y detectar varias fuentes de rayos X anteriormente desconocidas así como la gran variabilidad de las mismas. Esta región también fue observada con el instrumento francés SIGMA a bordo de la misma misión, proporcionando imágenes de mejor resolución angular en el rango de energías por encima de 35 keV. Se descubrieron objetos emisores de rayos X, fuertemente variables, pero ninguno de ellos se puede identificar con el centro de la galaxia (figura 106). Posiblemente,

Fig. 106: Los $15^\circ \times 15^\circ$ en torno al plano galáctico. El mapa -en la parte superior- es una composición de todas las diferentes fuentes observadas por SIGMA en Granat entre 1990 y 1994. En la parte inferior se muestran los espectros de dos de las fuentes más representativas del CG: GX5-1 una binaria de rayos-X del bulbo galáctico que contiene una estrella de neutrones, y 1E 1740.7-2942, una binaria X parecida a Cyg X-1 que alberga un agujero negro. Esta última experimentó el 13-14 de octubre de 1990 una fuerte emisión de fotones con energías próximas a 511 keV, sugerente de procesos de aniquilación de pares electrón-positrón. De E. Churazov y colaboradores, en First Results of Asca, Universal Academy Press, Tokio, pág. 492 (1994).



en la pequeña región cuyos alrededores observamos, la opacidad de la materia interestelar es demasiado alta, incluso para los fotones X más energéticos.

Aunque *Rosat* ya ha barrido el plano galáctico en su mapeo de la esfera celeste (figura 107), observaciones dedicadas por completo a la zona del CG han sido logradas con el instrumento PSPC (lámina 12). En total, 15 fuentes fueron detectadas en los $30' \times 30'$ centrales. Una de ellas, 1E 1742.5-2859 ya observada con *Einstein*, fue resuelta en tres objetos, siendo uno de ellos coincidentes con el centro de la galaxia, llamado Sagittarius A* (Sgr A*), a sólo $10''$ (ver cuadro XIII), lo que probablemente indica que esa fuente X es el propio núcleo galáctico o un objeto muy cercano.

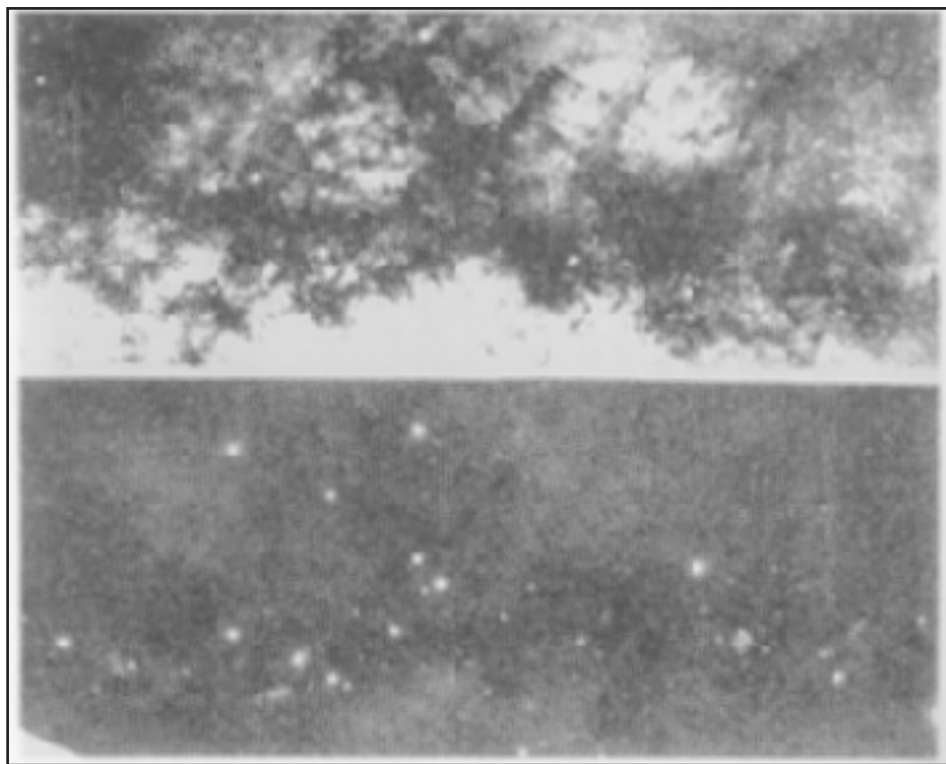


Fig. 107: La zona del plano galáctico alrededor del centro de la Galaxia. Ambas imágenes abarcan $40^\circ \times 15^\circ$. La superior en el visible, con una lente de gran campo; la inferior en rayos X blandos, proporcionada por Rosat. Las fuentes más brillantes son binarias X albergando estrellas de neutrones o agujeros negros, mientras que la emisión más difusa proviene de nubes de gas calentadas por explosiones SN. De W. Voges, en First Results of Asca, Universal Academy Press, Tokio, pág. 204 (1994).

Entre los resultados de *Asca*, cabe destacar la detección de la fuente X cercana a Sgr A*. El espectro (0,5-10 keV) indica un alto valor de la densidad columna, lo que hace suponer que se encuentra dentro (o detrás) de una nube molecular. Podría ser la fuente A1724-289 en estado «de reposo». Además, esta misión ha confirmado la línea de emisión a 6,7 keV en el CG, muy cerca de Sgr A*. Sin embargo, la línea de emisión a 6,4 keV procede de una zona sensiblemente mayor, a lo largo del plano galáctico. Las zonas más brillantes se corresponden con la estructura conocida como el Radio Arco y la nube Sagittarius B2. Muy probablemente, su origen se debe a fluorescencia con motivo de la irradiación de una brillante fuente X que está escondida y de la cual sólo vemos la emisión X dispersada. Y para concluir, decir que el último objeto sorprendente que ha aparecido en la región ha sido GRO J1744-28, del cual damos más detalles, para el lector interesado, en el cuadro XIV.

CUADRO XIII. EL CENTRO DE LA GALAXIA

Nuestra galaxia, cuya proyección sobre la bóveda celeste conocemos con el nombre de Vía Láctea o Camino de Santiago, esconde todavía secretos muy importantes en su centro. Durante los últimos años, se ha llevado un escrutinio sistemático y detallado en todas las longitudes de onda posibles, fundamentalmente, en regiones del espectro no perturbadas por la extinción debida a la absorción del medio interestelar. El centro de la Galaxia se encuentra oculto tras un velo de polvo y gas interestelar denso. Sólo las ondas de radio han permitido «ver» algunas estructuras en el núcleo de la Galaxia. La mayor parte de la radiación emitida por esta región se produce a longitudes de onda mucho más cortas, en el rango espectral del azul y el ultravioleta. Sin embargo, esta radiación es completamente absorbida por el medio que encierra el centro de la Galaxia y hemos de contentarnos con los fotones mucho más escasos, y posiblemente menos representativos, que consiguen escapar. Un grupo de astrónomos europeos en el Observatorio de La Silla (Chile) razonaron sin embargo, que tendría que haber un compromiso entre un gran flujo de radiación, que no atraviesa la nube de polvo y gas, y un flujo muy pequeño que la atraviesa libremente. A ciertas longitudes de onda, el flujo que llega a la tierra podría ser suficiente para su detección con los nuevos instrumentos disponibles de forma significativa. En efecto, empleando el nuevo telescopio NTT de La Silla, estos astrónomos pudieron fotografiar la región en la dirección al CG por vez primera en el infrarrojo cercano a longitudes de onda entre 8.500 y 11.000 Å, para extender la observación años más tarde hasta los 22.000 Å, con un instrumento especial diseñado para tal fin y denominado SHARP.

Por otro lado, las observaciones radioastronómicas han proporcionado nuevas pistas. Investigadores de la formación de radiotelescopios VLA de Nuevo México (Estados Unidos) han encontrado un enigmático objeto en las proximidades del centro de la galaxia que presenta enormes fluctuaciones de brillo. El objeto descubierto es una fuente puntual a unos 35 segundos de arco, o 4 años luz, de distancia de Sgr A*, identificado con el centro de la Galaxia. Diferentes medidas realizadas en la primera mitad de 1991 muestran grandes variaciones de brillo, pero debido a la enorme absorción existente no es posible detectarlo en longitudes de onda visibles. El origen de la radiación, de acuerdo con la emisividad en varias frecuencias, parece ser electrones en movimiento a gran velocidad en un campo magnético fuerte, es decir, radiación sincrotrón. Sin embargo no está claro cómo se produce esta situación, habiéndose sugerido la presencia de supernovas, etc.

Cerca del centro de la Galaxia se sitúa un complejo de fuentes intensas de ondas radio conocido como Sgr A. Las últimas observaciones sugieren que hay una conexión entre las nubes de gas y el centro de la Galaxia. Posiblemente, las nubes de gas alimentan con material fresco al centro de nuestra galaxia.

Observaciones infrarrojas con el observatorio aerotransportado Kuiper de la NASA, han permitido encontrar que la emisión más intensa en el infrarrojo lejano proviene de un disco que rodea a la radiofuente occidental de Sgr A. Además han determinado que las nubes de gas no sólo rotan alrededor del centro galáctico sino que tiene una componente de caída que convierte su trayectoria en una espiral, lo que conecta físicamente las mencionadas nubes con Sgr A*, la radiofuente compacta dentro de la Sgr A occidental, que se identifica con el centro dinámico de la galaxia. Una estimación de las masas involucradas sugiere que unas decenas de masas solares se añaden cada año al disco que rodea Sgr A occidental. Teniendo en cuenta que una nube tiene del orden de 100.000 masas solares, este sistema alimenticio podría durar del orden de un millón de años. Las últimas pruebas las han proporcionado los alemanes A. Eckart y R. Genzel, cuyos estudios en el IR con el instrumento SHARP en el telescopio NTT de La Silla, revelan que podemos encontrarnos ante un conjunto de materia de 2,5 millones de M_{\odot} , dentro de 0,05 años-luz centrales de la radiofuente compacta Sgr A* (figura 108), lo que sugiere que nuestra Galaxia, como la gran mayoría de las galaxias del Universo, también alberga en su centro un agujero negro supermasivo.

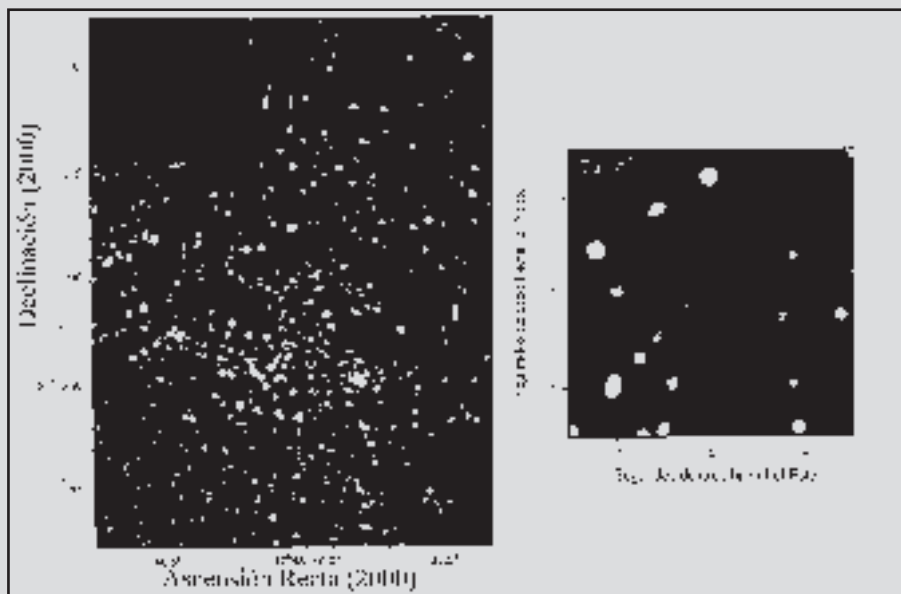


Fig. 108: El cúmulo de estrellas observado en el infrarrojo en torno al centro galáctico Sgr A* (marcado con una cruz), aún sin contrapartida IR. De K. Menten y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 475, *The American Astronomical Society, The University of Chicago Press*, L113 (1997).

CUADRO XIV. GRO J1744-28, UN NUEVO TIPO DE FUENTE EN LA GALAXIA

Imaginemos un objeto celeste que al mismo tiempo que gira sobre sí mismo, produce violentas explosiones en las cuales radia tanta energía en 10 segundos como el Sol hace en 1 día. Tal fuente no había sido observada durante los 35 años de existencia de la Astronomía X, hasta que el 12 de diciembre de 1995, el americano Jerry Fishman, la griega Chryssa Kouvelroton y colaboradores anunciaron -por medio de la circular n° 6272 de la Unión Astronómica Internacional- el descubrimiento de un objeto hasta entonces desconocido en el violento y variable cielo en rayos X y gamma. Observado por el instrumento BATSE en el *CGRO*, y bautizado como GRO J1744-28 por su posición en el cielo, producía explosiones de rayos X a un ritmo de una cada 3 minutos el día 2 de diciembre, fecha en que se observaron un total de 140. La cadencia de estas explosiones se redujo a una cada 50 minutos diez días después. La posición del objeto, aunque presentaba una incertidumbre de 6° de radio, indicaba sin duda alguna que se encontraba en la línea del Centro Galáctico.

Anteriormente se conocían unas 40 fuentes X que producen explosiones en nuestra Galaxia. Salvo un único caso, las restantes producían explosiones de tipo I (cuyo espectro X es diferente que en la de tipo II). Así que una de las primeras cuestiones planteadas sobre GRO J1744-28 ha sido sobre el tipo de las explosiones: ¿tipo I o tipo II? La respuesta la tenía BATSE: las características espectrales observadas mostraban que el espectro de las explosiones no se pueden explicar mediante un modelo de radiación de cuerpo negro -como en las de tipo I- sino que más bien se ajustaban a una ley de potencias. Las explosiones observadas en GRO J1744-28 eran pues, de tipo II. Un mes después del descubrimiento, se vio que una fuente, también desconocida, había ido emergiendo día a día en los datos que proporcionaba BATSE en la banda de energía 20-100 keV. Todo parecía indicar que se trataba del mismo objeto descubierto un mes antes. Ello lo reforzaba el hecho de que el espectro de las explosiones X observadas en la «primera» fuente era similar al espectro observado en la «segunda» fuente estable, lo que también sugiere un proceso físico común tanto para las explosiones como para la emisión persistente. Pronto se anunció que la emisión X era periódica, con un periodo de 467 ms. Estábamos ante un pulsar de rayos X, de los que se conocen unos 30 en nuestra Galaxia. Son estas pulsaciones, conjuntamente con las explosiones X observadas lo que hacen de GRO J1744-28 un objeto único en la Galaxia. Se conocen más de 20 fuentes pulsantes en rayos X -todas ellas asociadas a estrellas de neutrones-, así como una docena de fuentes que producen explosiones de rayos X, pero jamás se había observado en una misma fuente este doble comportamiento. GRO J1744-28 ha sido la primera. El análisis Doppler de los pulsos, que presentan ligerísimas diferencias en torno a los 467 ms en función del periodo orbital del

sistema, ha confirmado la sospechada naturaleza binaria de GRO J1744-28. Y teniendo en cuenta los parámetros orbitales anteriormente expuestos, se puede determinar la función de masa X del sistema, $F_x(M) = 1,31 \times 10^4$. Asumiendo la inclinación $i < 30^\circ$ y $M_x = 1,4 M_\odot$ (valor típico para una estrella de neutrones), tenemos que $M_c = 0,065-0,14 M_\odot$, lo que implica que GRO J1744-28 pertenece a la clase de binarias de rayos X de baja masa. Otro hecho importante descubierto por el *RXTE* es que la emisión en X disminuía siguiendo cada explosión, necesitando varios minutos para recobrar su nivel inicial.

A tenor de los hechos observacionales aquí descritos, la interpretación más adecuada para GRO J1744-28 es un sistema binario con un periodo orbital de 11,8 días en el que una estrella de neutrones -que gira sobre sí misma a razón de 2,1 veces por segundo- está engullendo materia proveniente de una estrella compañera de baja masa ya evolucionada. Las explosiones de tipo II observadas en este objeto, con fotones más energéticos que los observados en la otra fuente que produce explosiones similares, implican que nos encontramos ante una estrella de neutrones con un campo magnético mayor ($B \sim 10^{11-12}$ G). En este caso, el material penetra a través de los polos magnéticos, a causa de inestabilidades en el disco de acrecimiento que aún no están bien comprendidas. También deben existir condensaciones de masa que giran cerca de la estrella de neutrones y que ocasionalmente se ven engullidas, dando lugar a las microexplosiones y QPOs observadas.

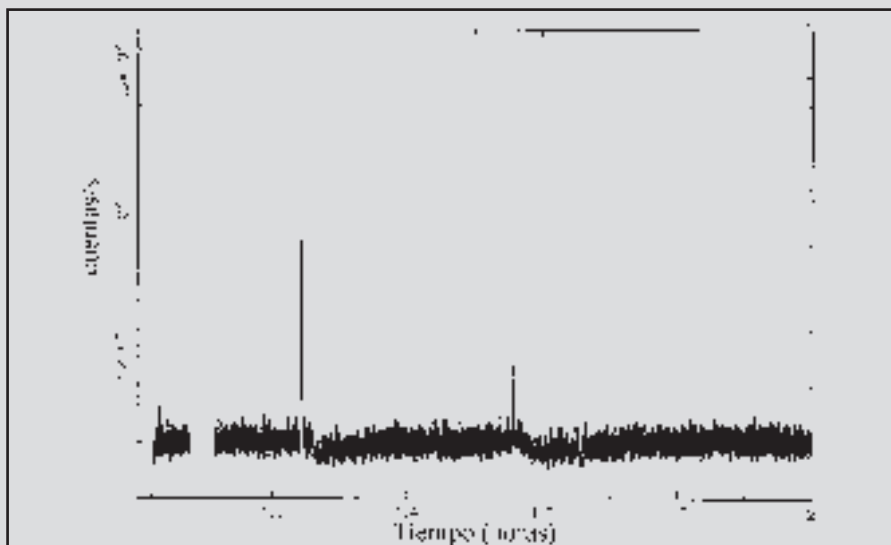


Fig. 109: Dos de las explosiones X observadas en GRO J1744-28 por *RXTE* en enero de 1996. Obsérvese como hay una disminución de flujo de rayos X después de cada explosión, como si parte del disco de acrecimiento se desplomara sobre la estrella de neutrones cada vez que va a acontecer una explosión.

CAPÍTULO 5

V El mundo extragaláctico

La Astronomía extragaláctica constituye también un campo joven, aunque no tanto como el de la propia Astronomía X. No fue hasta la década de los años 20 cuando el americano Edwin Hubble, que había estado observando «nebulosas peculiares» con el flamante telescopio de 2,5 m de diámetro del Monte Wilson, descubrió que éstas no eran simples acumulaciones de gas y polvo, sino auténticos «universos-islas» o galaxias como la nuestra, con decenas (o cientos) de miles de millones de estrellas. En 1922 el estonio Ernst J. Öpik determinó la distancia a la galaxia de Andrómeda (M 31) en algo más de 2 millones de años-luz, y C. Wirtz y K. Lundmark (en 1924-25) observaron el desplazamiento de las líneas espectrales hacia el rojo, pero fue Hubble quien en 1929 advirtió la dependencia lineal que figura en la ley que lleva su nombre. Años después se supo que las galaxias aparecen agrupadas en cúmulos y éstos últimos, a su vez, en supercúmulos. Actualmente se sabe que el número de galaxias supera los 50.000 millones.

Cuando se desarrolló la Astronomía X, muchos de estos objetos extragalácticos también resultaron ser fuertes emisores en rayos X, siendo M 87 la primera galaxia observada en este rango, allá por el año 1965. Actualmente, de las 80.000 fuentes X observadas por *Rosat* en todo el cielo, un 1% son galaxias normales, un 50 % son los llamados «núcleos activos» (AGNs) y un 8 % son cúmulos de galaxias. De todos ellos hablaremos en este capítulo. El resto (41 %) lo constituyen objetos de nuestra Galaxia, estrellas y binarias X en su mayoría, con un 0,2 % del total debido a residuos de supernova. Comenzaremos nuestro itinerario por las galaxias normales.

5.1. Galaxias normales

A 160.000 años-luz de nosotros, la Gran Nube de Magallanes, pequeña galaxia satélite de la nuestra, fue observada en rayos X en el año 1968, como una fuente extensa (12°). Se utilizó un cohete de sondeo que portaba un par de contadores

proporcionales, diseñados por Hans Mark y colaboradores, del grupo del laboratorio Lawrence Livermore, de la Universidad de California (lámina 14). En su hermana menor, la Pequeña Nube de Magallanes, solamente un objeto fue detectado y las conclusiones fueron tratadas con cautela debido a la debilidad de la señal. Los resultados fueron mejorados en 1970 por Richard Price y colaboradores al utilizar un detector con mayor area colectora. A estas galaxias le siguieron M 31 en Andrómeda y M 33 en el Triángulo, pertenecientes igualmente a nuestro Grupo Local, y distantes algo más de 2 millones de años luz. En la década de los setenta, las observaciones realizadas primero con *Uhuru* y posteriormente con *Einstein*, pusieron de manifiesto que todas las galaxias normales, de cualquier tipo morfológico, son también fuentes extensas de emisión de rayos X, con luminosidades $L_X \sim 10^{42}$ erg/s.

Las galaxias normales, tienen luminosidades en el rango X que son solamente una fracción de la energía emitida en el rango óptico e infrarrojo, como era de esperar si la principal componente emisora de radiación son las estrellas, pero los fenómenos que podemos estudiar mediante la observación de rayos X son únicos y proporcionan una información importante para comprender su estructura y evolución. Así, por ejemplo, mediante rayos X podemos estudiar los productos finales de la evolución estelar que tiene lugar en las galaxias para diferentes tipos morfológicos, como son los restos de explosiones supernova y las estrellas compactas. Se pueden obtener pistas importantes acerca de las últimas fases evolutivas de las estrellas de estas galaxias con las medidas X. En el caso de las galaxias elípticas se ha descubierto una envolvente gaseosa (un halo) que emite rayos X y abre un camino a la observación de algo similar a las «coronas» galácticas.

Dentro de la categoría de galaxias normales, podemos considerar:

1. Galaxias espirales normales,
2. Galaxias espirales de baja luminosidad,
3. Galaxias elípticas y lenticulares.

La emisión de rayos X de las **galaxias espirales «normales»** ($L_X \sim 10^{35}$ - 10^{40} erg/s) proviene principalmente de la contribución conjunta de:

- a) binarias X del tipo masivo (HMXBs), con luminosidades $L_X \sim 10^{35}$ - 10^{40} erg/s.
- b) binarias X de baja masa (LMXBs), $L_X \sim 10^{35}$ - 10^{38} erg/s.
- c) residuos de supernova, $L_X \sim 10^{35}$ - 10^{38} erg/s.
- d) coronas estelares, en especial en galaxias con importantes brotes de formación estelar, $L_X \sim 10^{28}$ - 10^{33} erg/s.
- e) una pequeña contribución del gas difuso calentado por explosiones supernova,
- f) una pequeña contribución del núcleo.

El satélite *Einstein* fue el primero en encontrar numerosas fuentes puntuales en las nubes de Magallanes y en la Galaxia de Andrómeda (M 31), entre ellas algunas fuentes supersuaves. También *Rosat* hizo observaciones detalladas para

buscar nuevas fuentes en estas galaxias, detectando más de 150 en M 31, algunas de ellas supersuaves (láminas 14 a 16). Además, ha detectado halos en algunas espirales normales como NGC 4565 (figura 110) y en nuestra propia galaxia, así como en algunas galaxias activas tipo Seyfert, de las que hablaremos en este capítulo. ¿Implica ello que nuestra galaxia fue activa en un pasado?

Por lo que respecta a las **galaxias espirales de baja luminosidad**, presentan también emisión X, pero la fracción dominante en este caso proviene de sistemas binarios con componentes compactas que pertenecen a la galaxia.

La emisión de las **galaxias elípticas y lenticulares** ($L_X \sim 10^{39}$ - 10^{42} erg/s), supera a veces a las propias espirales. Esta emisión X proviene en principio de halos asimétricos extensos (figura 111), lo que implica la existencia de un gas caliente en equilibrio hidrostático con el pozo de potencial galáctico. La evidencia observacional más directa de la existencia de una componente gaseosa muy caliente en las galaxias elípticas es la detección de emisión de rayos X, desplazada respecto al centro de la imagen óptica en la galaxia M 86 en el cúmulo de galaxias de la Virgen, como cabría esperar de una galaxia con una componente gaseosa que va barriendo a lo largo del medio del cúmulo (figura 117). Además, se conoce que otras galaxias elípticas con altas luminosidades en el óptico también muestran una componente gaseosa caliente. El origen de este halo es lo que aún no está claro, aunque podría deberse a procesos de calentamiento (térmicos) por parte de vientos estelares o flujos producidos en las explosiones de supernova. La interpretación de las observaciones de *Asca* (hasta 10 keV) necesita una segunda componente espectral más dura, con el fin de ajustar los espectros observados.

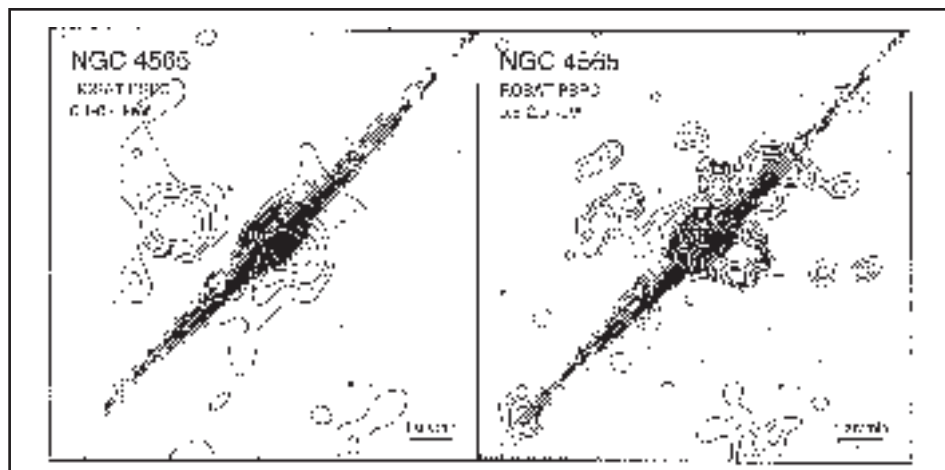
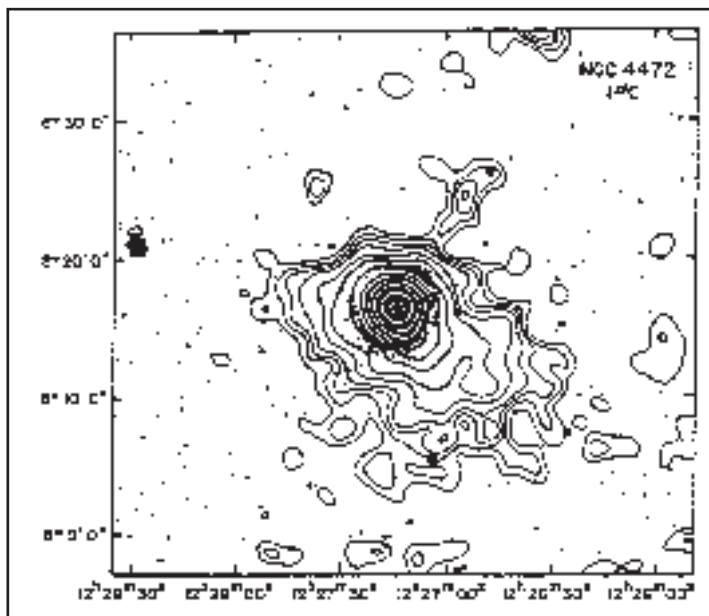


Fig. 110: Observación de NGC 4565 por Rosat en dos rangos de energía diferentes. El mapa de contornos de emisión X constante se ha superpuesto a una imagen de la galaxia obtenida en el rango óptico (al igual que en la figuras 111-113). NGC 4565 está vista de perfil, siendo similar a nuestra Vía Láctea. Da idea de cómo un observador extraterrestre vería nuestra Galaxia. La emisión X del halo está causada por un gas con temperatura de 2 millones de grados. Este gas pudiera ser el fósil de una actividad de tipo «starburst» ya extinguida. De A. Vogler, W. Pietsch y P. Kahabka, *Astronomy and Astrophysics*, 305, The European Physical Society, Les Editions de Physique, Les Ulis, pág. 83 (1996).

Fig. 111: Observación de la galaxia elíptica NGC 4472 por Einstein (HRI). Nótese el halo asimétrico. De G. Trinchieri, G. Fabbiano y C. Canizares, *Astrophysical Journal*, 310, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, pág. 639 (1986).



Así pues, la medida de rayos X permite la determinación de masas y distribución de la densidad en las galaxias, en su mayor parte por radiación de frenado del medio interestelar, aunque no puede descartarse una contribución importante procedente de sistemas binarios de rayos X. Las coronas calientes o la componente caliente del medio interestelar sólo pueden estudiarse a través de la emisión X.

5.2. Galaxias con brotes de formación estelar.

Dentro de la categoría de galaxias con brotes de formación estelar, podemos considerar:

1. Galaxias espirales con actividad extendida en toda la galaxia,
2. Galaxias espirales con actividad en el núcleo,
3. Galaxias H II.

Las galaxias espirales con intensos brotes de formación estelar (conocidas en inglés como «*starbursts*»), y cuyo prototipo es NGC 7714, presentan líneas de emisión, pero no tan intensas como para poderlas clasificarlas en otra categoría. No son fuentes luminosas en X. La gran mayoría de estas galaxias fueron descubiertas por el armenio B. Markarian y colaboradores, quienes entre 1967 y 1981 se dedicaron a buscar galaxias con fuerte emisión UV en el continuo, aunque un 10% de ellas resultaron no ser *starbursts* sino AGNs del llamado tipo Seyfert. Atendiendo al lugar donde se origina su actividad, se consideran dos tipos: con actividad extendida, o con actividad concentrada en el núcleo.

En las galaxias espirales con **actividad extendida** en toda la galaxia, la actividad se encuentra en todo el disco, como ocurre en M 83 (figura 112). La emisión X se debe a la contribución conjunta de residuos de supernova, binarias X masivas y emisión coronal de estrellas jóvenes.

En las galaxias espirales con **actividad en el núcleo**, la actividad se concentra, como su nombre indica, en la región nuclear, donde también se observa una intensa emisión en el infrarrojo lejano. Ejemplos típicos son M 51, M 82, NGC 253 y NGC 6946. Las luminosidades X son del orden de 10^{39} erg/s, siendo estas observaciones en rayos X las que nos ofrecen nueva información acerca de fenómenos ligados a la actividad de formación estelar en los núcleos de las galaxias como por ejemplo, el gas caliente lanzado al exterior desde la región central de galaxias (figura 113). Los espectros X son consistentes con la superposición de espectros individuales -con absorción debida al polvo- de espectros de supernova, binarias X y coronas estelares jóvenes.

Las **galaxias HII** suelen ser galaxias irregulares, que contienen intensos brotes de formación estelar que comprenden la mayor parte de la Galaxia. *Rosat* detectó por vez primera variaciones rápidas de los rayos X en la galaxia IRAS 15564+6359, una región HII desde el punto de vista óptico y radio, aunque sería clasificado como núcleo galáctico activo desde el punto de vista de la Astronomía X, lo que sugiere que hay objetos que contienen al mismo tiempo brotes de formación estelar junto con un núcleo activo.

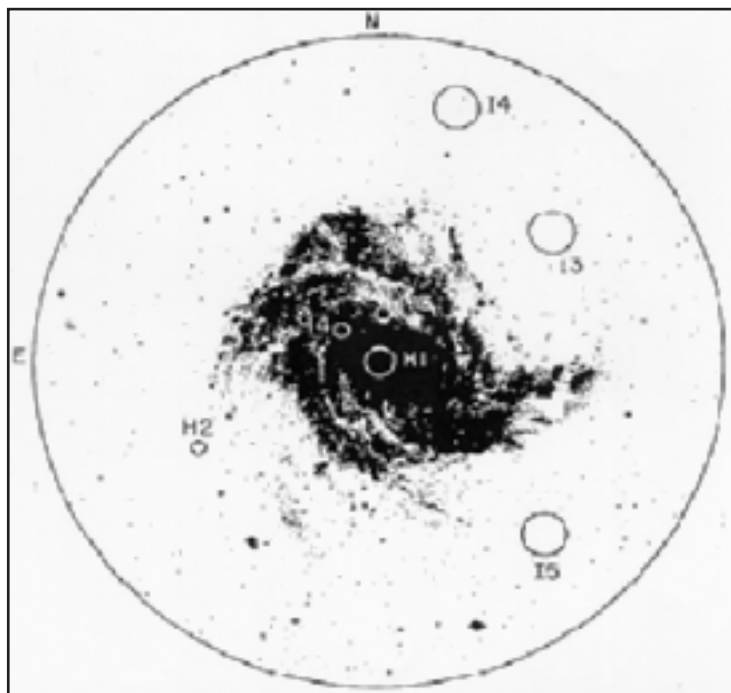
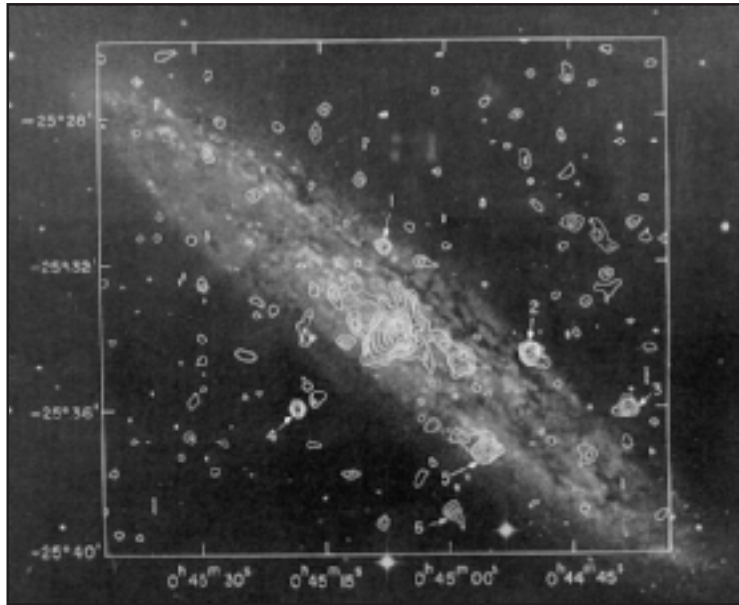


Fig. 112: Observación de M 83 por Einstein (HRI). Se observa la emisión de la mayoría del disco de la galaxia, así como varias fuentes puntuales. De G. Trinchieri, G. Fabbiano y G. Palumbo, *Astrophysical Journal*, 290, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, pág. 96 (1985).

Fig. 113: Observación de NGC 253 por Einstein (HRI), una galaxia «starburst». Las fuentes señaladas con flechas podrían ser binarias X de la propia NGC 253. Un penacho de emisión X se extiende 9 kpc en la dirección del semieje menor. De G. Fabbiano y G. Trinchieri, *Astrophysical Journal*, 286, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, pág. 492 (1984).



5.3 Los núcleos activos de galaxias.

Existen otros objetos aún más enigmáticos en el Universo. Ya en 1908, un espectro óptico de lo que por entonces se pensaba era una «nebulosa» (NGC 1068 = M 77) fue obtenido por E. Faith, quien advirtió la presencia de intensas líneas de emisión. La tal «nebulosa» iba a ser el prototipo de una clase de galaxias identificadas como especiales por Carl Seyfert en 1943. Pero no fue hasta 1955, al iniciarse las observaciones en radio y ser dicho objeto detectado, cuando esta clase de galaxias recibirían especial atención. Tanto estas como otras radiogalaxias fueron recogidas en los catálogos de radiofuentes de Cambridge (3C, 3CR y 4C) y Parkes (PKS).

Igualmente extraño fue la detección en radio de algunos objetos con apariencia estelar pero con fuertes líneas de emisión en su espectro óptico (no de absorción, como las estrellas normales). El misterio que rodeaba a estas «radio-estrellas» tan anómalas se solucionó cuando en 1963, el americano de origen holandés Maarten Schmidt examinó el espectro óptico de la radio-estrella número 273 del catálogo 3C, un objeto muy azul y brillante (magnitud 13) de la constelación de la Virgen. Comprobó que el corrimiento al rojo ($z = 0.158$) lo situaba muy distante, lo que hacía de él no una estrella si no un objeto extragaláctico superluminoso. Después le seguirían otros muchos a los que, en su conjunto, se les designaría «objetos cuasi-estelares» o «cuásares». Son objetos muy azules ($U-B < 0$), con intensas líneas de emisión ensanchadas. Hoy se sabe que los cuásares son los objetos astronómicos más lejanos que conocemos y que residen en los núcleos de determinadas galaxias.

CUADRO XV. EL CORRIMIENTO AL ROJO

El corrimiento al rojo z es una magnitud observacional que se define como la diferencia de la longitud de onda λ observada en el objeto, con respecto a la longitud de onda λ_0 observada en el laboratorio:

$$z = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1$$

Por ejemplo, en el caso de 3C 273, M. Schmidt advirtió la presencia de una serie de líneas de emisión en el espectro óptico, líneas que explicó como las de la serie de Balmer del H (como H β a 4861 Å), y la del Mg II a 2798Å, y que le permitieron calcular $z = 0,158$. Aplicando la ley de Hubble :

$$d = \frac{cz}{H_0} = 3000z h_0^{-1}$$

donde d es la distancia en Mpc, c la velocidad de la luz y H_0 la constante de Hubble (h_0 en unidades de $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), y asumiendo $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (el valor más probable a tenor de los últimos resultados), tenemos que 3C 273 se encuentra a 630 Mpc (ó 2.000 millones de años luz), lo que hace de 3C 273 uno de los objetos más brillantes del Universo.

En general, estos dos tipos de objetos (galaxias Seyfert y cuásares) comprenden la mayor parte de lo que se llaman Núcleos Activos de Galaxias (NAGs o AGNs, del inglés *Active Galactic Nuclei*), y emiten aproximadamente igual cantidad de energía por década de frecuencia, desde radio hasta los rayos X.

El catálogo de *Uhuru* recogió en 1974 los tres AGNs más brillantes del cielo X: 3C 273, NGC 4151 y Cen A. El primero fue observado en 1967 por H. Friedman y E. Byram. Las luminosidades en la banda X se sitúan en el rango $L_X \sim 10^{40}$ - 10^{45} erg/s y, a diferencia de otras fuentes de rayos X que hemos mencionado anteriormente, los AGNs generan un porcentaje importante de la energía total en este rango. En estas galaxias con núcleos activos, la radiación observada procede de una región de tamaño reducido alrededor de su centro, a tenor de las variaciones temporales observadas en rayos X, en escalas de menos de 1 minuto. ¿Cuál es el mecanismo responsable de la generación de esta radiación?

Como hemos dicho, la mayor parte de la radiación se emite desde regiones relativamente pequeñas. Parece claro pues, que las mejores pistas acerca de su naturaleza han de provenir del estudio del continuo de emisión en rayos X que se corresponde con el rango de energías más altas en las que se pueden obtener imágenes y espectros de cierta resolución. Asimismo, será necesario estudiar cómo se modifica el espectro de radiación conforme varía la fuente.

En general, los primeros instrumentos, como *HEAO-1*, mostraron que todas las galaxias presentan un espectro similar en la banda X clásica (2-10 keV), respondiendo bastante bien a un ajuste matemático en forma de una ley de potencias con índice espectral $\alpha \sim 0,7$.

CUADRO XVI. LA LEY DE POTENCIAS

Muchos de los fenómenos que apreciamos en la naturaleza, quedan bien descritos por una ley de potencias (número de terremotos de una cierta energía frente a dicha energía, número de especies con un cierto tamaño frente al tamaño, etc...). Entre ellos, cómo no, los espectros de la mayoría de las fuentes X extragalácticas de la clase AGN. Como quiera que la radiación sincrotrón (ver apéndice) es el principal proceso físico implicado, el espectro de la radiación en gran medida, responde a una ley de potencias, es decir,

$$F(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$$

donde $F(\nu)$ es el flujo por unidad de frecuencia ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$), ν es la frecuencia emitida, y α el índice espectral (por lo general $\alpha \sim 0,7$). A veces es preferible, no obstante, expresar el flujo en función de la longitud de onda ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$). Al ser el flujo emitido por unidad de frecuencia el mismo que por unidad de longitud de onda, $F(\nu) d\nu = F(\lambda) d\lambda$. Como $\nu = c/\lambda$ entonces $F(\nu) = \lambda^2 F(\lambda)/c$. Por ello,

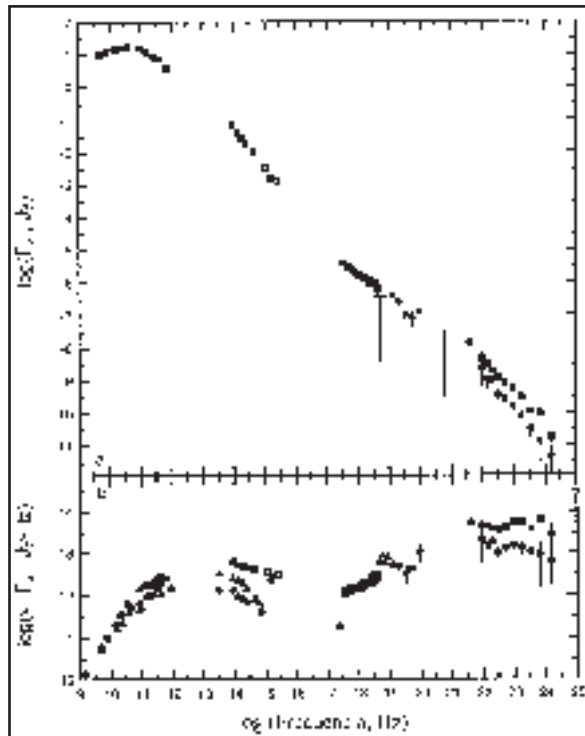
$$F(\lambda) \propto \lambda^{\alpha-2}$$

Sin embargo, los astrónomos de rayos X dan el flujo por unidad de energía (bien en fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$ o bien en $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$), y al ser $E = h\nu$, siendo h la constante de Planck, y el flujo emitido por unidad de frecuencia el mismo que por unidad de longitud de onda (como en el caso anterior), $F(\nu) = hF(E)$. Por ello,

$$F(E) \propto E^{-\alpha}$$

En el caso específico de los cúasares, es también útil representar el producto $E F(E)$ en función de E (o $\nu F(\nu)$ en función de ν), y con escalas logarítmicas tanto en el eje de ordenadas como el de abscisas, ya que refleja de una manera mejor la cantidad de energía emitida por unidad de frecuencia. La ley de potencias queda entonces como $\nu F(\nu) \propto \nu^{1-\alpha}$ y $\alpha = 1$ correspondería a una línea horizontal. La diferencia entre ambas representaciones se aprecia bien en la figura 114.

Fig. 114: En la parte superior, el espectro a partir de observaciones multibanda simultáneas (desde radio hasta rayos gamma) del «radio-quiet» cuásar 3C 279, en junio de 1991 (cuadrados) y octubre de 1991 (círculos). En la parte inferior, se muestra la distribución espectral de energía, que da una mejor idea de la energía involucrada en cada banda con respecto a otras. De R. Hartman y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 461, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, pág. 708 (1996).



Las observaciones de *Einstein* en el rango X blando, entre 0,2 y 3,5 keV, determinaron variaciones sustanciales en la pendiente del espectro de radiación continua, que puede llegar a ser muy pronunciada en algunos AGNs. Estos resultados fueron confirmados posteriormente por *Exosat*, al poder observar en energías más bajas, de modo que pudo detectar más fácilmente la absorción fotoeléctrica por gas que afecta a los fotones menos energéticos, y también los excesos blandos presumiblemente debidos a la cola del exceso ultravioleta. A lo largo de las líneas siguientes iremos describiendo someramente las características observacionales de cada uno de los diferentes tipos de objetos.

Atendiendo a la emisión radio (fuerte o débil) y a la luminosidad, podemos considerar una clasificación de AGNs en cuatro grandes grupos:

1. Radiogalaxias y radiocuásares,
2. Blázares: objetos BL Lac y objetos muy variables en el óptico (OVV),
3. Regiones con líneas nucleares de baja-ionización («liners»),
4. Cuásares con baja radioemisión, galaxias Seyfert 1, Seyfert 2, y galaxias X con líneas de emisión estrechas («NLXGs»).

Las **radiogalaxias** más potentes están relacionadas con galaxias elípticas luminosas, muy numerosas a altos valores del corrimiento al rojo z . Según la anchura de las líneas de emisión observadas, se subdividen en BLRGs (anchas, del inglés «Broad Line Radio Galaxies») y NLRGs (estrechas, «Narrow Line Radio

Galaxies»). Cygnus A pertenece a esta clase, la segunda fuente más brillante en radio tras Cassiopeia A. En los años setenta, el satélite *Einstein* confirmó la existencia de una región concentrada de emisión de rayos X en el núcleo de Centaurus A, al igual que en M 87, mostrando en ésta última que la emisión de rayos X a lo largo de los chorros de materia que emanan del núcleo, están alineados con la estructuras observadas en radio. La radiación X de estos chorros aparentemente se produce por el mecanismo de *bremssstrahlung*, lo que requiere un plasma caliente. También se observó emisión de rayos X en muchas otras galaxias activas, algunas de ellas presentando una variabilidad muy rápida, propia de regiones emisoras muy pequeñas.

CUADRO XVII. LÍNEAS DE EMISIÓN Y ENSANCHAMIENTO

Una línea de emisión se produce cuando en un átomo excitado, un electrón realiza una transición de un nivel más energético a otro de menor energía. Como quiera que estos niveles dependen de la masa del núcleo y del número de electrones, la línea de emisión proporciona información inequívoca acerca del elemento presente en el gas que produce el espectro. Si todos los átomos del gas estuvieran estacionarios, sin movimiento, la línea de emisión producida sería muy, muy estrecha. Sin embargo, lo más normal es que esos átomos tengan una cierta temperatura, y que por ello, se muevan más o menos rápidamente en todas direcciones. Es por ello por lo que la radiación emitida se verá afectada como consecuencia del efecto Doppler, modificándose la longitud de onda inicial a la que se detectaría la radiación, produciéndose un desplazamiento hacia el rojo o hacia el azul. Como consecuencia, el resultado conjunto de la emisión de radiación por parte de todos los átomos va a ser una línea ensanchada, cuyo perfil se suele asemejar a un perfil gaussiano, al tener el gas una distribución maxwelliana de velocidades.

Los cuásares tienen propiedades parecidas a las galaxias Seyfert, de las que hablaremos después, pero con luminosidades mayores y desplazamientos hacia el rojo de las líneas espectrales más acentuadas. Realmente, pertenecen a la población más luminosa de la misma familia de objetos. Según el cociente entre su emisión en radio y su emisión en el óptico, se clasifican en radiocuásares («*Radio-loud*») y cuásares con baja radioemisión («*Radio-quiet*»). Los **radiocuásares**, cuyo prototipo es 3C 273, suelen presentar -en radio- movimientos *aparentes* con velocidades superlumínicas (mayores que la de la luz). Son además fuertes emisores en X ($L_X \sim 10^{45}$ erg/s) con índices espectrales $\alpha \sim 0,5$ en la ley de potencias. En 3C 273, *Asca* confirmó el exceso en los rayos X blandos observados previamente con *Exosat*, aunque no ha detectado la línea del hierro a 6,4 keV como ocurre en otros cuásares más débiles. En algunos objetos se detectó un incremento dramático de la intensidad de rayos X, habiéndose postulado la existencia de haces de emisión en rayos X similares a los

invocados para los objetos BL Lac. Es lo que *Ginga* observó, a modo de erupción ultrarrápida de apenas tres minutos en el cuásar PKS 0558-504. Lo interesante de este descubrimiento es que una erupción de la energía observada requiere la existencia de movimientos en el núcleo del cuásar con velocidades próximas a la de la luz. Claramente, el tamaño de la región responsable de la rápida erupción observada ha de ser menor que tres minutos luz, y hay que recurrir a interpretaciones relativistas del comportamiento de la radiación en el entorno de un posible agujero negro que debería encontrarse en el centro del cuásar. Por primera vez, se puede estudiar el efecto conocido por los astrofísicos como focalización relativista del haz, para explicar las observaciones de PKS 0558-504. Otro fenómeno de interés es la presencia de fuerte absorción (densidades columna de 10^{21} - 10^{22} átomos/cm²) en el espectro X para radiocuásares situados a altos corrimientos al rojo ($z \sim 3$), que no se observa para objetos más cercanos. Ello podría deberse a la presencia de nubes absorbentes «amortiguadores de Lyman- α » («*damped Lyman- α absorbers*») entre los cuásares y nosotros, de modo que por absorción fotoeléctrica retienen los fotones menos energéticos. Estas nubes podrían ser consideradas como los discos de protogalaxias (galaxias aún en proceso de formación).

Los objetos BL Lac y OVV son emisores en radio y también se conocen como blázares. Los **BL Lac**, así llamados por haberse pensado inicialmente que el prototipo (BL Lacertae) era una estrella variable, son similares a los radiocuásares y variables en todas las escalas de tiempo. En el óptico, se caracterizan por la ausencia de líneas de emisión y absorción en su espectro. Ya en el rango X, BBXRT confirmó los resultados del satélite *Einstein* al detectar una absorción notoria a 0,5 keV en el objeto PKS 2155-304, también observada por *Asca*, lo que requiere la presencia de un absorbente como ocurre en las Seyfert. Por su parte, *Rosat* observó un flare en X 0716+714 y determinó que el espectro X es más complicado, y necesita una ley de potencias doble para poder ajustar bien los datos.

Los objetos **OVV** son un estadio intermedio entre los BL Lac y los radiocuásares, con anchas líneas de emisión pero débiles. Presentan grandes variaciones de su luminosidad óptica ($\sim 0,1$ magnitud por día), siendo el prototipo 3C 279, cuyo espectro multirrango se presenta en la figura 110. Durante la observación realizada por *Asca* en 1993, se vio que apenas había habido variación en el flujo X con respecto a una observación anterior de *Ginga* y, dado que por entonces se encontraba emitiendo fuertemente en radio, se advirtió la diferenciación entre las regiones donde se produce la emisión radio y la emisión X.

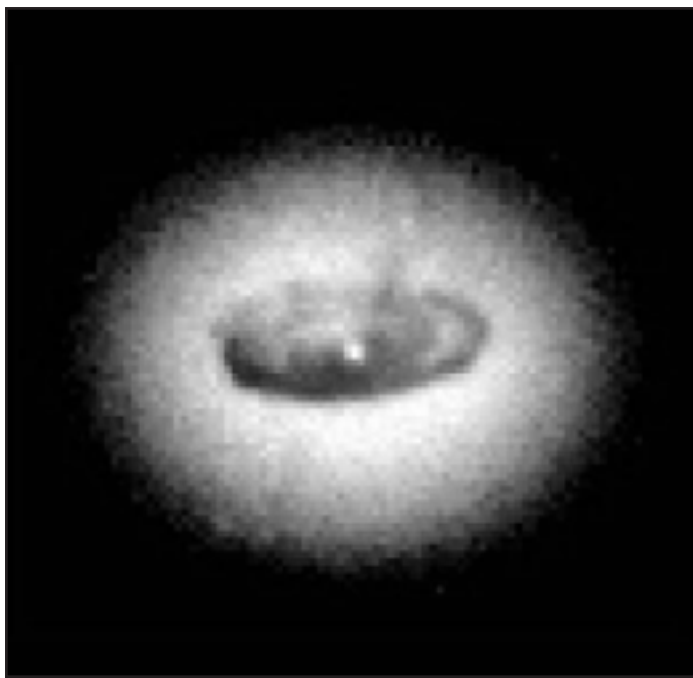
Tanto las **regiones nucleares con líneas de baja ionización** (LINERs, «*Low Ionization Emission Line Region*») como las galaxias brillantes observadas con el satélite IRAS son más débiles en rayos X que los restantes tipos de AGNs, con luminosidades $L_X \sim 10^{43}$ erg/s. En particular, las LINERs presentan en el óptico intensas líneas de emisión del oxígeno y nitrógeno, y son más abundantes a flujos débiles, pudiendo encontrarse en los halos de casi la mitad de todas las galaxias espirales.

Los **cuásares con baja radioemisión** (del inglés «*Radio-quiet*») son similares -en el óptico- a los radiocuásares, aunque su emisión X (comparada con la óptica) es mucho más débil. Uno de los más brillantes (magnitud 13.8) y cercanos es HE 1029-10401, descubierto por el grupo de Hamburgo utilizando placas tomadas con el telescopio Schmidt en Calar Alto (Almería). En el dominio X, el índice α de la ley de potencias es 1-1,2 lo que los hace más evidentes en esta banda que las galaxias Seyfert. De hecho, en el rango de los rayos X blandos, son los núcleos activos más comunes, 30 veces más abundantes que los radiocuásares. Utilizando *Rosat* se ha estudiado el comportamiento del espectro X de estos cuásares, en función del corrimiento al rojo (hasta $z \sim 3$), y se ha encontrado que una ley de potencias (constante) no es únicamente válida, sino que es necesaria la existencia de otra componente variable (por ejemplo, un espectro de cuerpo negro) para ajustar las observaciones.

Las galaxias Seyfert son galaxias espirales en su mayoría (95%), recogidas en el trabajo pionero de Fritz Zwicky (1971). Presentan un núcleo activo con líneas de emisión anchas en el óptico correspondientes a estados excitados de átomos pesados. En las galaxias **Seyfert 1**, cuyo prototipo es NGC 4151, estas líneas son muy anchas (del orden de 1.000 a 5.000 km/s) mientras que en las tipo 2 las líneas son más estrechas (alrededor de 500 km/s). Las luminosidades X son sensiblemente mayores que en cuásares de baja radioemisión. *Ariel-5* detectó rápida variabilidad X, y *Exosat* observó igualmente variaciones de corto periodo que implicaban reducidas dimensiones para las regiones donde se generan los rayos X. El estudio mediante *Ginga* de la galaxia Seyfert NGC 5548 simultáneamente con el ultravioleta, empleando el satélite *IUE*, demostró la correlación entre las variaciones de flujo en los dos rangos espectrales, aunque con un retraso de algunos días. Esto sólo puede interpretarse bien de manera que la radiación ultravioleta es debida al calentamiento del disco de acrecimiento por los rayos X de la fuente central, o bien que los rayos X se generan mediante dispersión Compton de los fotones ultravioleta (ver apéndice). La imagen del disco de acrecimiento rodeando el objeto central en NGC 4258 (lámina 18) se muestra en la figura 115. Igualmente, otras observaciones realizadas con *Ginga* de galaxias Seyfert 1 en el rango entre 2 y 12 keV mostraron que el espectro X se reproduce bien mediante una ley de potencias con un índice espectral intrínseco $\alpha = 0,9$. Al ser reflejados una parte de los fotones en material frío (disco de acrecimiento), dan lugar a un espectro emergente con índice espectral de $\alpha = 0,7$, como el observado, pero este modelo requiere la presencia de una línea de emisión del hierro, centrada a energías inferiores a 6,4 keV producida por fluorescencia y que era desconocida anteriormente.

Además se observaron excesos por encima de lo previsto por la ley de potencias tanto para energías bajas como para energías por encima de 10 keV, hecho que vuelve a apuntar a la existencia de material frío en las cercanías de la fuente central, donde una buena fracción de los rayos X primarios que allí se originan, sufren una

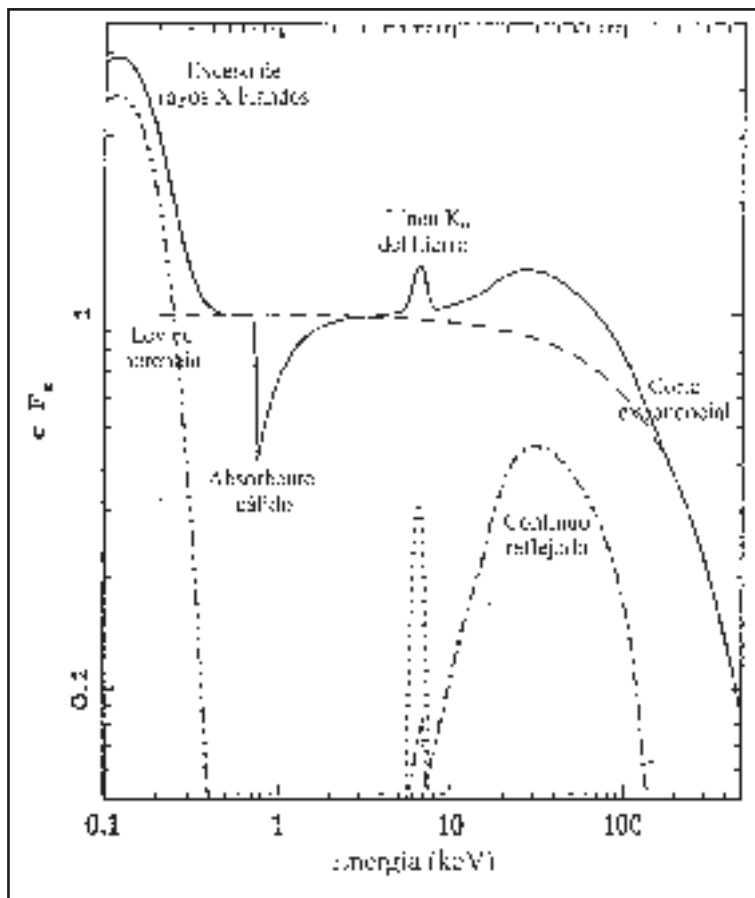
Fig. 115: Imagen de HST del disco de acrecimiento que rodea al objeto compacto de la galaxia Seyfert 1 NGC 4261, a 100 millones de años luz. La dimensión del disco es de unos 800 años luz de diámetro. Se ha calculado que el objeto en el centro del disco contiene una masa de 1.200 millones de masas solares. Cortesía de L. Ferrarese (NASA/ESA).



reflexión. Los fotones de más baja energía son absorbidos, mientras que si tienen una energía muy alta van a perder parte de ella a costa de cederla a los electrones. Además, un porcentaje de los rayos X absorbidos liberan un electrón de la capa K del átomo de hierro emitiendo la línea de fluorescencia $K\alpha$. Todo ello da lugar a los espectros observados por *Ginga*. La figura 116 muestra el modelo teórico que mejor se ajusta a los datos observacionales. La línea de emisión del hierro es de suma importancia para comprender la naturaleza de los objetos extragalácticos en rayos X y, por primera vez, el experimento BBXRT pudo observar una línea de emisión intrínsecamente estrecha (150 keV) -la línea K del Fe- en el núcleo de la galaxia NGC 4151 de tipo Seyfert 1. Esta línea de emisión junto con umbrales de absorción del hierro, debidos a material ionizado, conforman una característica relativamente común de los espectros de las galaxias Seyfert 1. Aunque la energía del umbral K debería ser 7,1 keV, se observa a 8 keV, implicando un alto estado de ionización.

Por otra parte, las galaxias **Seyfert 2**, como NGC 1068 (= M 77, el prototipo) presentan en el óptico líneas más estrechas (hasta 1.000 km/s) y en X muestran absorciones fotoeléctricas muy fuertes (con densidades de columna de hasta 10^{23} átomos/cm²) por lo que, aunque en el rango óptico representen el 30% de las galaxias Seyfert, en rayos X son fuentes difíciles de detectar, bastante más débiles que las Seyfert 1. Además se descubrieron líneas anchas en el espectro de la radiación polarizada, producidas como consecuencia de la dispersión de estos fotones

Fig. 116: El espectro característico de un AGN tipo Seyfert 1, representado por la línea continua. Las líneas discontinuas trazan cada una de las contribuciones a la forma final del espectro. De Andy Fabian, en *Röntgenstrahlung from the Universe*, Zimmerman, H., Trümper, J. y Yorke, H. (eds.), MPE Report, pág. 403 (1996).



por parte de electrones, desviándolos hacia nuestra visual. Todos estos indicios refuerzan la idea del modelo unificado de AGNs (figura 117), creado por Robert Antonucci en 1993, en el que las galaxias Seyfert 2 son realmente iguales que las Seyfert 1 pero oscurecidas por parte del toro molecular que rodea al objeto central, cosa que no ocurre en las Seyfert 1, al estar vistas desde un ángulo diferente. Por su parte, los espectros de las galaxias Seyfert 2 observadas por *Ginga* y *Asca* mostraron importantes componentes de absorción, así como múltiples líneas entre 6 y 7 keV (líneas K de fluorescencia de iones del hierro en diferentes estados de ionización). En general, las observaciones de galaxias tipo Seyfert 2 han puesto de manifiesto algunas pruebas y limitaciones de los modelos unificados de núcleos activos de galaxias.

Las **galaxias X con líneas de emisión (NLXGs)** son fuentes X intensas, galaxias espirales o irregulares con líneas de emisión permitidas y prohibidas con anchuras entre 300 y 600 km/s. El prototipo es NGC 2992. Parece ser que son Seyferts muy oscurecidas.

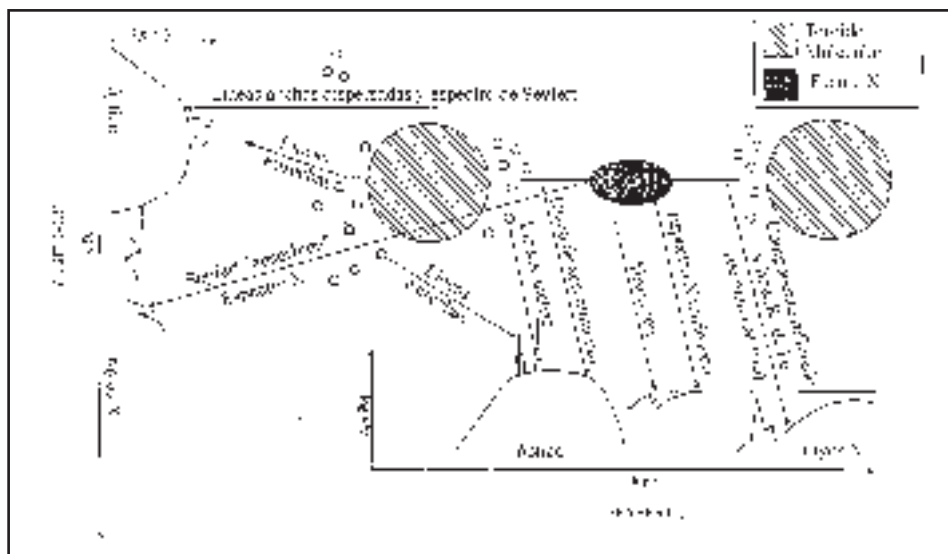


Fig. 117: El origen de las distintas emisiones en las galaxias Seyfert 1 y 2 desde el óptico hasta los rayos X en las cercanías de la fuente compacta central. Aunque el modelo es muy simple, la realidad es ciertamente más compleja. Según Lodewijk Woltjer, en *Active Galactic Nuclei*, Courvoisier, T. J. L. y Mayor, M. (eds.), Springer-Verlag, Berlín (1990).

CUADRO X. ¿OTROS MIEMBROS DEL ZOO?

Las **galaxias IRAS brillantes** fueron clasificadas como tales después del catálogo de fuentes IR obtenido por el satélite *IRAS*, a partir de los flujos en 25 y 60 micras, pues los espectros IR de los AGNs son más planos que los de las galaxias normales. En realidad, no son una clase distinta, sino que incluyen cuásares, Seyferts, objetos BL Lac e incluso «starbursts». En algunos casos, las luminosidades X e IR son comparables. *Rosat* y *Asca* observaron la galaxia IRAS 09104+4109, descubriendo una intensa línea de Fe a 4,6 keV, y favoreciendo el modelo según el cual, los rayos X observados están siendo dispersados por material frío alrededor de un cuásar escondido, con $L_X \sim 10^{43}$ erg/s. Esta línea se supone que es la combinación de las dos líneas del hierro a 6,4 y 6,7 keV observadas en el laboratorio, determinando $z \sim 0,45$ en este caso.

El rastreo espectral de cuásares y galaxias Seyfert mostró la existencia de correlaciones entre el flujo en ondas radio y la pendiente del espectro de rayos X en el rango entre 0,2 y 4 keV, así como la existencia de un exceso de radiación en los rayos X más blandos, explicable posiblemente a través de la existencia de un disco de acrecimiento. En cuanto a la naturaleza de la fuente central, la observación de variaciones de la emisión de rayos X con intervalos de pocas horas, indica que el tamaño de la fuente responsable ha de ser relativamente reducido y, por tanto, no parece posible explicar la emisión mediante supernovas. Por otro

lado, la observación de la línea K del hierro en 6,4 keV no es compatible con una emisión puramente térmica que implicaría la presencia de dicha línea en 6,7 keV. De hecho, la línea no se observa exactamente a 6,4 keV sino a energías inferiores, implicando un corrimiento hacia el rojo gravitacional. Además, la línea es ancha, lo que indica que la fluorescencia se produce en un disco de acrecimiento. ¿Cuál es el objeto que se encuentra en el centro de este disco de acrecimiento? La respuesta la ha dado *Asca*, con motivo de la observación de la galaxia MGC 6-30-15. El espectro X obtenido (figura 118) muestra en la línea una componente estrecha así como una componente muy ancha desplazada hacia el rojo. Esta última proporciona información sobre el corrimiento al rojo gravitacional y la distancia a la que la línea es emitida, que ha resultado ser de 3 radios gravitacionales, lo que equivale a la última órbita estable de un agujero negro.

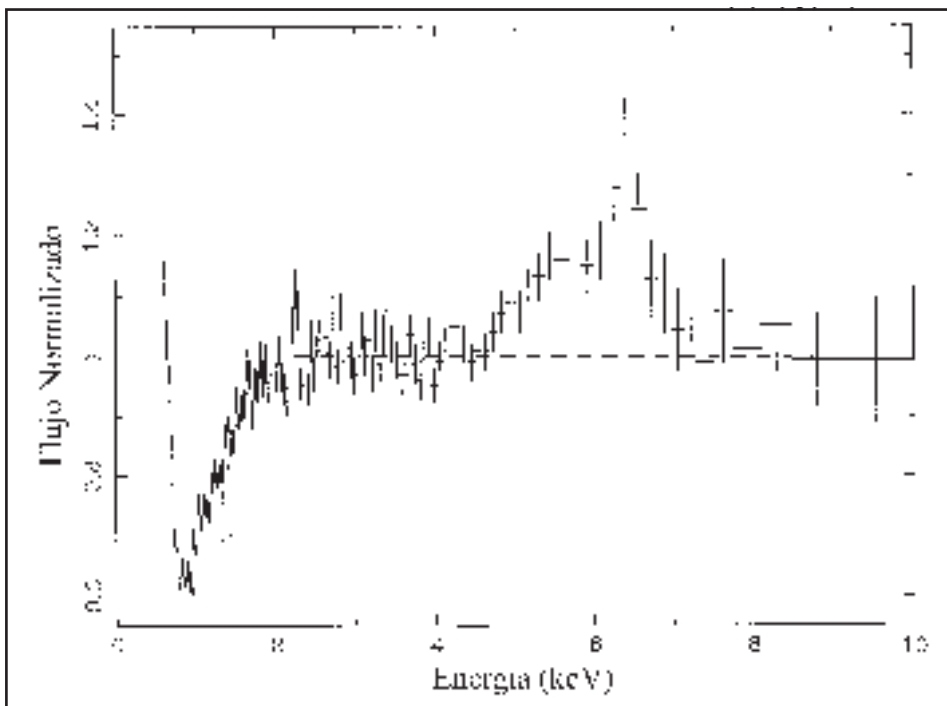
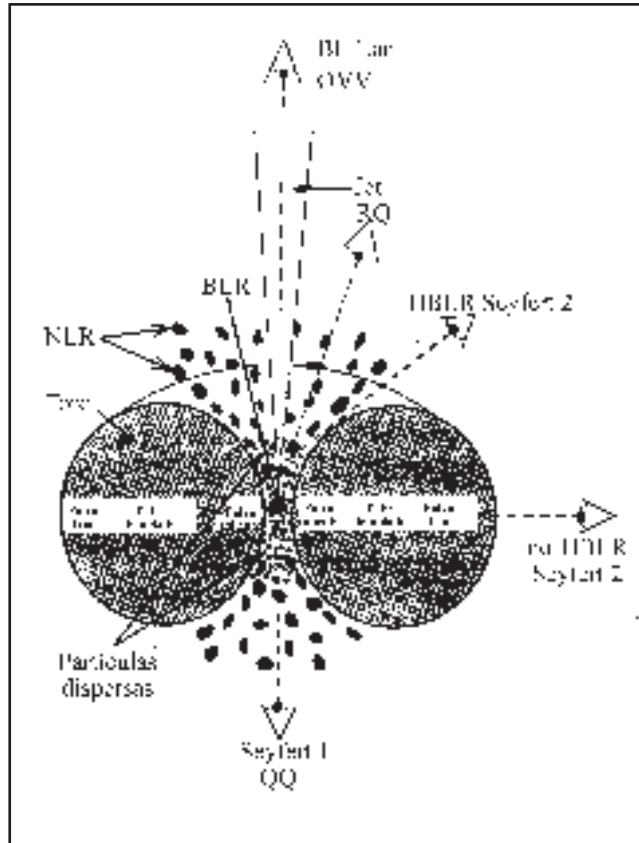


Fig. 118: El espectro X de MGC 6-30-15 observado por *Asca*. Nótese la anchura y las dos componentes de la línea fluorescente del hierro. De Y. Tanaka y colaboradores, *Nature*, 375, MacMillan, Londres, pág. 659 (1995).

Así pues, el modelo más aceptado para los AGNs es el de un agujero negro central supermasivo (con $10^7 - 10^9$ masas solares) que va tragando materia procedente de un disco de acrecimiento formado a su alrededor. Éste a su vez está rodeado por un toroide de gas y polvo (figura 119). La materia de dicho disco, de forma similar a lo que vimos en algunos sistemas binarios de rayos X, se calienta por

Fig. 119: El modelo unificado de AGNs, en el que un toroide de materia molecular y ópticamente gruesa (en gris) de varios parsecs rodea el núcleo. En la parte superior se genera un chorro relativista, que puede apuntar en nuestra línea de visión. En la parte inferior, la otra componente del chorro es mucho más débil e imposible de detectar. Si el chorro intercepta nuestra línea de visión, veremos un objeto BL Lac o OVV. En caso contrario, si vemos el núcleo directamente pero no el chorro, observaremos una Seyfert 1. En el caso de una orientación intermedia, también podremos apreciar un radio-cuásar (RQ) si vemos directamente el núcleo, o una Seyfert 2 donde se aprecian las líneas de emisión anchas (HBLR) en el espectro polarizado, en caso de ver por encima del toroide molecular. Pero si éste intercepta gran parte de la radiación, detectaremos una Seyfert 2 con líneas estrechas solamente (no-HBLR). BLR denota la región donde se forman líneas de emisión anchas, y NLR las nubes que producen las líneas de emisión estrechas. Adaptado de la figura original de C. Heisler y colaboradores, Nature, 385, MacMillan, Londres, pág. 701 (1997).



compresión y radia en el proceso. Tanto el espectro observado en forma de ley de potencias como la presencia de material templado en las cercanías, afectado por la intensa radiación emergente del núcleo, son compatibles con este modelo. Las regiones que rodean el núcleo de la galaxia contienen gas en condiciones físicas capaces de producir líneas de emisión tanto anchas como estrechas en el dominio óptico. A partir de las medidas realizadas en los rangos óptico y ultravioleta y de los razonamientos teóricos, se piensa que la región responsable de las líneas de emisión anchas estaría formada por nubes de temperatura relativamente baja pero con densidad muy alta, a sólo días-luz del agujero negro en el caso de las Seyfert 1. Estas nubes podrían estar rodeadas de un medio caliente que llenaría el espacio entre ellas, de presión similar pero a una temperatura muy superior, aproximadamente 100 millones de grados. Tanto el espectro observado en forma de ley de potencias como la presencia de material templado en las cercanías, afectado por la intensa radiación emergente del núcleo, son compatibles con este modelo.

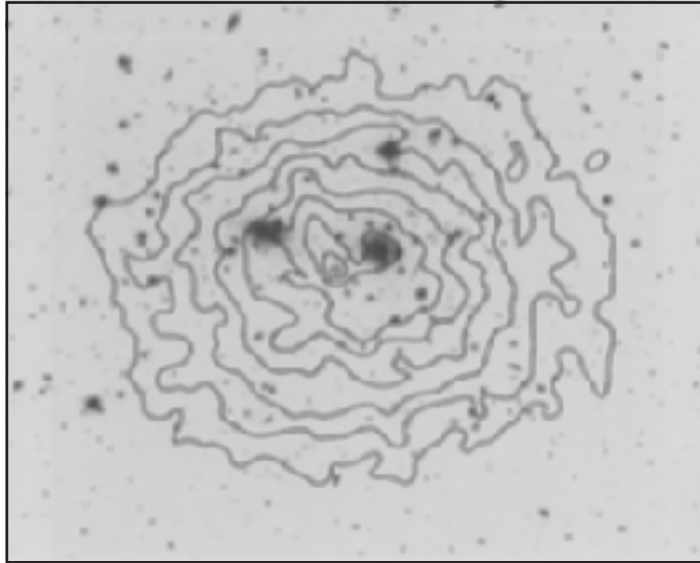
5.4. Cúmulos y Supercúmulos de galaxias

Los **cúmulos de galaxias** representan los objetos más grandes del universo conocido, aparte del mismo universo, que mantienen una ligadura gravitacional entre sus componentes. Fueron inicialmente estudiados por el alemán Maximilian Wolf en 1906. Un cúmulo contiene, por término medio cientos de galaxias, siendo fundamental para su estudio el trabajo de compilación que realizó el americano George Abell, quien utilizando las placas fotográficas del Monte Palomar, incluyó en su ya famoso catálogo de 1958 un total de 2.712 cúmulos. Desde aproximadamente los años sesenta, se sabe de la existencia de una diferencia muy marcada entre la masa visible en estos cúmulos, básicamente las estrellas de las galaxias que los componen, y la masa que se deduce de argumentos basados en el teorema del virial o similares, es decir, la necesaria para mantener el sistema completo en estado de equilibrio. Este problema de la masa «perdida» o de la materia oscura que es necesaria para igualar los dos tipos de aproximaciones, es aún hoy día uno de los temas básicos sin resolver por la Astrofísica. Incluso se puede extender el mismo problema a todo el Universo con el fin de disponer de la masa necesaria para que éste no se expanda indefinidamente.

Como hemos reseñado anteriormente, M 87, la galaxia central del Cúmulo de la Virgen se detectó en rayos X en 1965, y en una nueva observación hecha cuatro años después, se pudo discernir la emisión conjunta del resto de las galaxias del cúmulo. En 1971 y con dos contadores proporcionales a bordo de un cohete *Aerobee 150*, un equipo del NRL liderado por John Meekins observó con más detalle el cúmulo de Coma Berenice (Abell 1656). También hicieron lo mismo los grupos de G. Fritz y H. Gursky con el de Perseo (Abell 426). Estos tres cúmulos (Virgo, Coma y Perseo) son los más ricos entre los más cercanos a nosotros, a menos de 300 millones de años-luz. Fue en ese mismo año cuando se sugirió que todos los cúmulos podían ser detectados en rayos X, lo que demostró *Uhuru* con su catálogo de fuentes en todo el cielo, en donde ya se inferían luminosidades que hoy comprenden $L_X \sim 10^{42} - 2 \times 10^{46}$ erg/s. Además, y a diferencia del rango óptico donde es difícil delimitar la extensión de un cúmulo de galaxias, en rayos X aparecen como manchas extensas de emisión de forma más o menos esférica. En algunos casos, el centro de la emisión de rayos X coincide con una galaxia elíptica central muy masiva (ver figura 120). El hecho de que la emisión X es extensa, abarcando un área similar a la subtendida por las galaxias en los cúmulos, indica la existencia de una emisión procedente de un gas caliente, de composición aproximadamente solar que llenaba todo el cúmulo. *Ariel-5* confirmó que las fuentes X asociadas a los cúmulos no variaban como ocurría con el resto de las fuentes (galácticas o extragalácticas observadas) y posteriormente, *HEAO-1* realizó un estudio completo de unos 1.900 cúmulos de Abell.

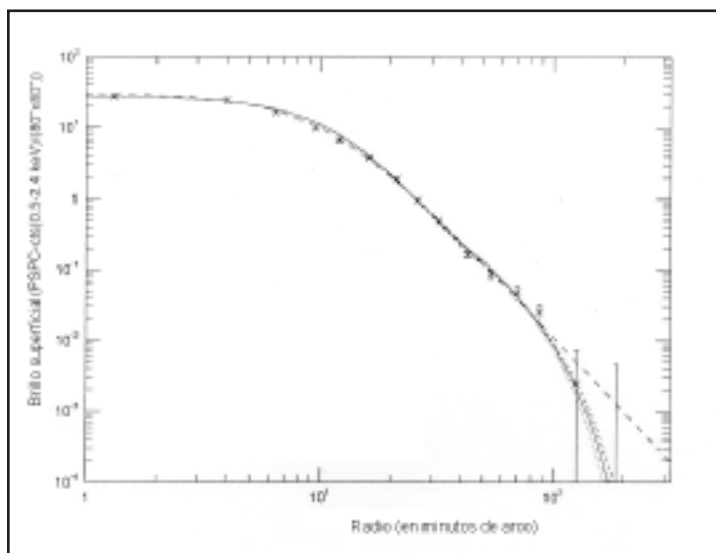
La distribución radial y la temperatura del halo de rayos X encontrado alrededor de la galaxia M 87 reveló un flujo de gas hacia el interior, enfriándose, y

Fig. 120: Las curvas de emisión X observadas por Einstein superpuestas a una imagen óptica del cúmulo de Coma. Según C. Jones y B. Forman, en X-ray emissions from clusters of galaxies, de C. Sarazin, pág. 112 (1988).



procedente del cúmulo en el que reside la galaxia (lámina 19). Estos resultados implican la existencia de una cantidad apreciable de materia oscura en el halo. Las distribuciones de gas emitiendo rayos X y de galaxias en numerosos cúmulos de galaxias mostraron una clara separación entre etapas diferentes de la evolución de los cúmulos (ver láminas 20 y 21). De hecho puede que estemos detectando la evolución cosmológica de los cúmulos. El estudio de la emisión de rayos X de este gas mediante imágenes obtenidas con el satélite *Einstein* (y posteriormente *Exosat*) permitió además estimar que la masa de este gas era, al menos, tanta como toda la

Fig 121: El brillo superficial (en rayos X) del cúmulo de Coma, según los datos del PSPC de Rosat (cruces). Las líneas representan el mejor ajuste encontrado según los diferentes modelos teóricos. Ello permite estimar, asumiendo $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, un radio de 39 millones de años-luz, y una masa de $2,4 \times 10^{15} M_\odot$. De N. Makino, Publications of the Astronomical Society of Japan, 46, pág. 142 (1994).

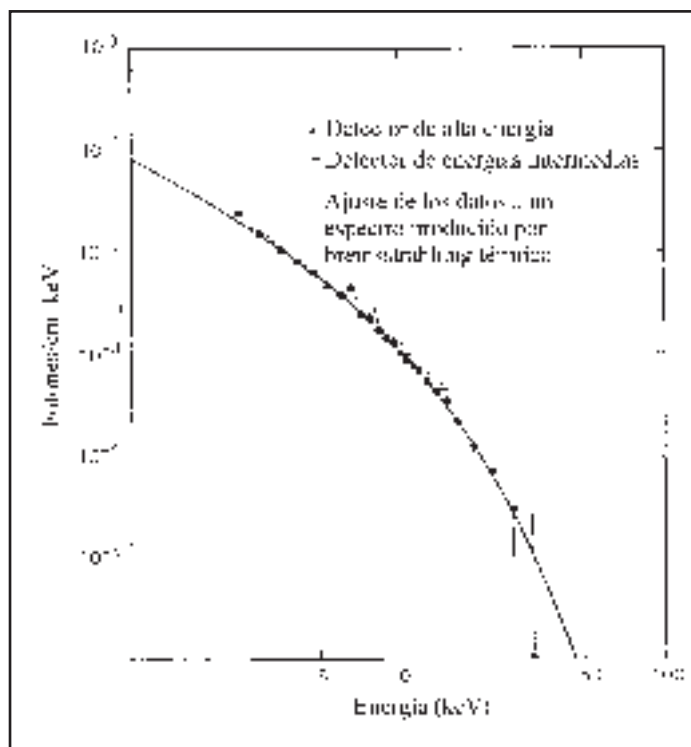


contenida en las galaxias en el centro del cúmulo y que esta relación entre el gas y las galaxias aumentaba a favor del gas conforme nos separamos del centro. En el caso de Coma, esta relación es de 5 a 1 (figura 121). Por tanto, el gas caliente que se observa en rayos X es la componente más importante de la masa de los cúmulos de galaxias aunque su existencia era desconocida hace sólo unas décadas. Por otro lado, los astrónomos dedujeron que si se podía determinar observacionalmente la temperatura y la distribución de la densidad del gas caliente atrapado en el pozo de potencial de los cúmulos de galaxias, las ecuaciones de equilibrio hidrostático nos darán la distribución de la masa total, es decir de las galaxias, el propio gas y la posible materia oscura. De esta forma se podría determinar, por primera vez la masa y distribución de la materia oscura y, con algo de suerte, incluso identificar la naturaleza física de la masa «perdida».

El espectro de la radiación X de los cúmulos de galaxias es debido a la emisión de un plasma caliente (100 millones de grados), ópticamente delgado y de baja densidad (10^{-3} átomos/cm³), enriquecido con elementos pesados y contenido en el pozo de potencial del cúmulo. El continuo se emite mayormente como consecuencia de procesos de radiación de frenado y de recombinación. Un espectro típico se muestra en la figura 122. Además, la presencia de una línea de emisión alrededor de 7 keV, correspondiente al hierro (Fe XXV), indica que el gas ha sido procesado previamente en sucesivas generaciones de estrellas a partir del material inicial existente al formarse las galaxias. Fue precisamente el satélite *OSO-8* el que primeramente detectó Fe XXV en cúmulos de galaxias. Este resultado confirmó que la emisión térmica de un gas caliente es una propiedad intrínseca de los cúmulos de galaxias. Las estrellas expulsaron al medio interestelar este gas enriquecido con metales pesados y, posteriormente, algún mecanismo lo traspasó al medio intergaláctico en el que actualmente se encuentra. En 1976, y por parte de R. Mitchell y colaboradores, se efectuó la primera medida de la línea de emisión del hierro a 7 keV en rayos X en una fuente extragaláctica: el cúmulo de Perseo. En este cúmulo de galaxias se detectó tanto la línea del Fe XXV como otra de Fe XXVI lo que confirma la existencia de plasmas con temperaturas entre 10 y 100 millones de grados.

Los dos resultados principales de la misión *Einstein* al respecto fueron que el gas contenía elementos pesados (O, Mg, Si y S) y, lo que es más importante, que el gas caliente en el centro de muchos cúmulos de galaxias era inestable térmicamente, y que se encuentra en un proceso de enfriado en escalas de tiempo relativamente cortas, del orden de algunos miles de millones de años. La existencia de estos flujos de gas enfriándose, que están siendo vertidos (a un ritmo de hasta 3.000 masas solares por año en el caso de RX J1347.5-1145) sobre la galaxia central del cúmulo, podría dar pistas muy importantes acerca de los mecanismos de formación de las galaxias. Por ello es fundamental la observación de estos flujos en cúmulos los más lejanos posible, con altos desplazamientos hacia el rojo ($z > 0.2$), lo que representa etapas más jóvenes de formación de galaxias. Con ello se podrá determinar la validez

Fig. 122: El espectro X de baja resolución del cúmulo de Coma tal como lo observó el experimento A-2 a bordo de HEAO-1. Incluye la línea del hierro a 7 keV. De M. Henriksen y R. Mushotzky, *Astrophysical Journal*, 292, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, pág. 441 (1986).



de los diferentes modelos evolutivos existentes para explicar la formación de las galaxias. *Asca* ha observado un cúmulo muy distante: Cl 0016+16 ($z = 0,545$), y ha podido determinar un valor aproximado de la constante de Hubble al combinar las temperaturas del plasma (obtenidas del espectro X) con la disminución de la temperatura del fondo de radiación de microondas (obtenidas en radio por debajo de 1,4 mm) al encontrarse los fotones con un medio caliente (el gas del cúmulo). Esto es lo que se conoce como Efecto Sunyaev-Zeldovich.

Por su parte, *Rosat*, con una sensibilidad de $10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ obtenida por el PSPC en sólo 10.000 s de integración, llegó a detectar cúmulos cercanos hasta cúmulos con $z \sim 1$ (lámina 22). Ello fue aprovechado por el español Francisco Castander, el inglés Richard Ellis y colaboradores, quienes comprobaron que hay un déficit en la densidad espacial de cúmulos brillantes en X, para valores de $z \leq 0,4$ y además, del estudio de los 22 cúmulos de galaxias detectados en los 14,9 grados cuadrados que subtiende el catálogo RIXOS (*Rosat International X-ray and Optical Survey*), se infiere que los cúmulos de galaxias son hoy en día más luminosos en rayos X que lo fueron en el pasado.

S. Murray junto con sus colaboradores sugirieron en 1978 que cierta fracción de cúmulos de galaxias observados como fuentes X y contenidas en el catálogo 4U de *Uhuru*, estarían asociadas con **supercúmulos de galaxias**, pues había más

emisión de la que uno esperaría encontrar simplemente sumando los flujos X de cada uno de los cúmulos integrantes. Sin embargo, estudios posteriores realizados por otros investigadores no han podido probar la existencia de dicha emisión. Más bien lo que descubrieron fue la existencia de halos muy grandes y luminosos en los cúmulos individuales, siendo la suma de éstos lo que daría el exceso detectado por Murray.

5.5. El fondo de radiación difusa de rayos X

Si observamos el cielo con ojos de rayos X, con una resolución de aproximadamente $1'$, veríamos un universo dotado de un brillo uniforme sobre el que destacan las fuentes brillantes, sin las zonas oscuras entre ellas que se ven en longitudes de onda visibles. Esto es lo que llamamos el fondo de radiación difusa de rayos X y, el problema de explicar su origen, es probablemente el más antiguo de la Astronomía X. El descubrimiento de la existencia de una radiación más o menos uniforme procedente de todo el cielo tuvo lugar con los primeros experimentos de rayos X en los años sesenta (ver capítulo I) mediante cohetes de sondeo. Sorprendentemente, después de tres décadas de observación con instrumentos cada vez más sofisticados seguimos sin saber a ciencia cierta el origen y naturaleza de *parte* de esta emisión difusa.

Debido a la relativa uniformidad del flujo de radiación difusa que recibimos de cualquier región del cielo, parece claro que esta radiación se produce a grandes distancias y tiene un origen de trascendencia cosmológica. Por otro lado, la alta temperatura que indica la distribución espectral de la radiación de fondo y el alto flujo integrado de la misma, ya que es la fuente más importante de fotones X observable, aumentan sin duda el interés por estudiar en detalle sus características. Asimismo, el estudio de la radiación de fondo difusa puso de manifiesto la isotropía a altas energías y un comportamiento más complejo a bajas energías. Por tanto se confirmaba el origen extragaláctico del fondo difuso de alta energía.

Hay dos modelos básicos para intentar comprender la emisión de fondo de rayos X: a) que proviene de una multitud de fuentes débiles puntuales que no podemos separar con la resolución espacial y la sensibilidad de los instrumentos disponibles de rayos X, y b) que la emisión es realmente difusa en escalas angulares relativamente grandes. Si el primer modelo es el correcto, tendremos que aceptar la existencia de una importante variación evolutiva de la luminosidad y del espectro de los AGNs y los cuásares a distancias de interés cosmológico, o la existencia de una población de objetos hasta ahora desconocidos a grandes distancias. Por su parte, si fuera correcto el segundo modelo, deduciríamos que una fracción importante de la materia bariónica total del universo fue calentada a altas temperaturas en épocas primitivas de la vida del universo. Por supuesto, se pueden inventar escenarios que combinen ambos modelos.

Cuando se definió la misión *Einstein*, se pensó precisamente en la obtención de imágenes de cielo profundo con los nuevos telescopios de rayos X y poder dilucidar de una vez el problema del origen de la radiación difusa de rayos X. Lamentablemente no fue posible, debido al ruido de fondo de los instrumentos, el estrecho rango de energías observado y las limitaciones en resolución espectral de las cámaras. Sin embargo, se vio en los resultados obtenidos que aumentando la calidad de los instrumentos ligeramente, sería posible resolver el problema en un futuro cercano. De hecho, la granularidad del orden de $1'$ encontrada en las imágenes de cielo profundo obtenidas con el satélite *Einstein* para estudiar la radiación de fondo difusa de rayos X, indica que la mayor parte de esta radiación no resuelta en fuentes puntuales se debe o bien a un plasma caliente o a numerosas fuentes de baja luminosidad que superan las 5.000 por grado cuadrado. La observación extensa con sensibilidades medias de un área extensa de 780 grados cuadrados del cielo con el satélite *Einstein* proporcionó un catálogo de 835 fuentes y la obtención de una mejor relación $\log N - \log F$, que indica la distribución del número de fuentes observadas N en función del flujo observado S . Además detectó numerosos cuásares llegándose a descubrir muchos de ellos en regiones aparentemente vacías, lo que podría explicar en un buen porcentaje la radiación difusa de rayos X como galaxias activas y cuásares no resueltos.

De las observaciones de *Rosat* en los rayos X blandos, desde **0,09 a 0,28 keV** (el umbral de absorción del Carbono), se infiere la emisión de una burbuja local (a una temperatura de 1 millón de grados), que posiblemente sea el resto de una explosión SN, que se extiende hasta ~ 650 años-luz del Sol, aunque un 25% pudiera provenir de emisión X en el halo galáctico. Desde **0,28 a ~ 1 keV**, la emisión está dominada por otro plasma caliente (entre 2 y 3 millones de grados) que tal vez pudiera ser la suma de emisión X en nuestra Galaxia y de gas caliente intracúmulo en el grupo local de galaxias, a la que pertenece la nuestra junto a M 31 y M 33 entre otras. A partir de 1 keV, la situación ya es más compleja y pasamos a presentar los resultados y las observaciones de *Rosat*, BBXRT, *Asca* y *Ginga*.

El satélite *Rosat* ha permitido obtener exposiciones profundas, es decir, con tiempos de integración largos, de regiones en principio vacías de fuentes de rayos X. Se ha llegado a medir campos tres veces más profundos que con el satélite *Einstein* y se ha encontrado un número de fuentes del orden de 70 por cada grado cuadrado. Además se han encontrado evidencias de estructuras en el fondo de rayos X con escalas de $20'$. En concreto una absorción importante se detectó en la constelación del Dragón de un grado de extensión a 0,25 keV debida a una nube interestelar. Una imagen en rayos X de la Luna (figura 83) mostró la iluminación debida a los rayos X solares dispersados y demostró una vez más el origen cósmico del fondo de radiación difusa. También se ha encontrado que todos los cuásares emiten rayos X y que el número de cuásares a grandes distancias puede explicar una importante fracción de la radiación difusa de rayos X: al menos un 60 % de esta radiación, en la banda **1-2 keV**, proviene de un gran número de cuásares a gran distancia

de nosotros. Ello lo ha confirmado *Rosat* por medio de una imagen del fondo de radiación X a través de la región donde hay menos absorción interestelar en la galaxia con una exposición de 2,4 días con el PSPC y 15,2 con el HRI, alcanzó la mayor sensibilidad obtenida hasta ahora ($F \sim 10^{-15}$ erg cm⁻² s⁻¹). Lo que se vio es un gran número de cuásares lejanos, con desplazamientos hacia el rojo entre 1 y 2, envueltos en un halo difuso de emisión X de baja energía o «blanda» (figura 123 y lámina 23). La densidad de objetos es de ~ 970 por grado cuadrado. Además se observa es un cambio de pendiente en el diagrama log N - log F , hacia $F \sim 2 \times 10^{-14}$ erg cm⁻² s⁻¹ (figura 124), que podría ser debido a la aparición de una nueva clase de fuentes con una función log N - log F totalmente distinta. De hecho, varios

Fig. 123: El diagrama log N - log F representa la distribución acumulativa de fuentes (N) en función del flujo de rayos-X observado (F). Los círculos negros representan los puntos obtenidos a partir de la observación de 207 ks del PSPC, mientras que los círculos blancos representan los datos conseguidos de la observación ultraprofunda (15,2 días) del HRI. De G. Hasinger y colaboradores, *Astronomy and Astrophysics*, 329, pag. 489 (1998).

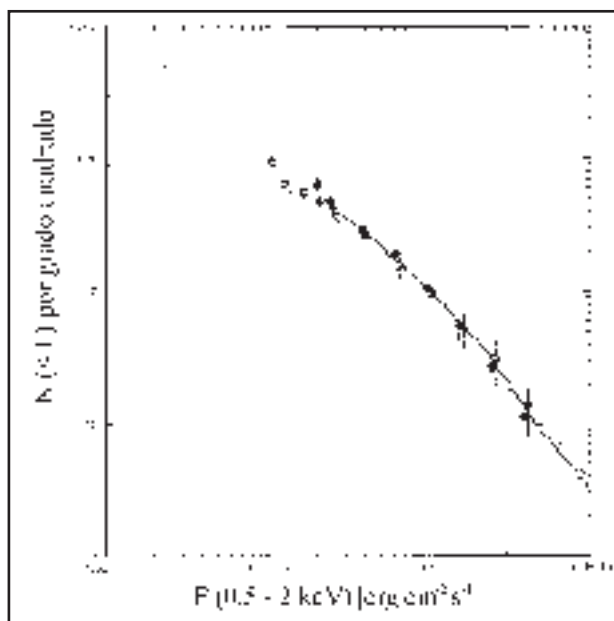
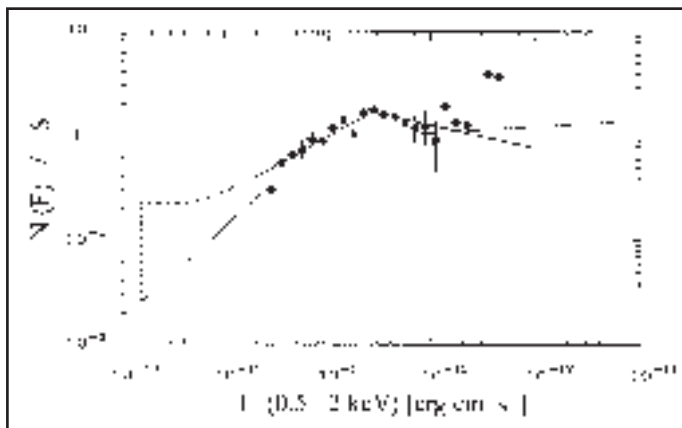


Fig. 124: Conteo diferencial de fuentes en función del flujo observado F en la banda 0,5-2 keV. Nótese el cambio de pendiente para $F = 2 \times 10^{-14}$ erg cm⁻² s⁻¹. De G. Hasinger y colaboradores, *Astronomy and Astrophysics*, 275, pág. 9 (1993).



trabajos (entre ellos el realizado por el español Xavier Barcons y colaboradores) indican que las fuentes más débiles tienen un espectro más plano, pudiendo tal vez ser galaxias con líneas de emisión estrechas y no solamente AGNs. Los últimos estudios, basados en las imágenes del PSPC (207 ks) y del HRI (1,32 Ms) han permitido confeccionar un catálogo de 50 fuentes con flujos X (0,5 - 2 keV) por encima de $5,5 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. También se ha podido realizar un nuevo diagrama log N- log F hasta un límite de flujo X de $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, donde la densidad de objetos es de 970 ± 150 por grado cuadrado. A estos niveles, entre un 70 y un 80 por ciento del fondo de radiación de rayos X queda perfectamente explicado por fuentes discretas. El contenido óptico de las 50 zonas de error anteriormente mencionadas, a través de los mayores telescopios terrestres, ha arrojado el siguiente balance: 39 galaxias activas, 3 grupos de galaxias, 1 galaxia normal, y 3 estrellas de nuestra galaxia. Cuatro de ellas quedan aun por identificar. Actualmente se piensa que hasta un 80% del fondo de radiación X en esta banda se puede atribuir a multitud de fuentes extragalácticas.

Por su parte, los datos de *Asca* sugieren que el espectro del fondo de radiación entre 0,4 y 10 keV queda bien modelado por una ley de potencias (figura 125) y confirman el exceso de radiación por debajo de 1 keV. El satélite asimismo ha

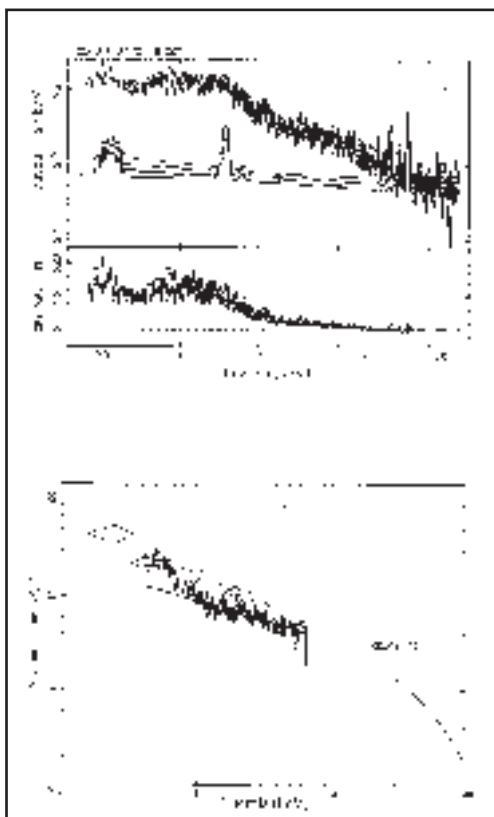


Fig. 125: Arriba: El fondo de rayos X desde 0,4 hasta 7 keV observado por *Asca* (cruces), junto con los datos de Einstein (diamantes) y los del HEAO-1, por encima de 100 keV. (Debajo) De K. Gendreau y colaboradores, Publications of the Astronomical Society of Japan, 47, The Universal Academy Press, Tokio, L5 (1995).

realizado observaciones profundas (hasta 2×10^{-14} erg cm⁻² s⁻¹ en la banda 2-10 keV) en algunos campos. El satélite *Ginga* realizó estudios de fluctuaciones en campos aparentemente vacíos y se dedujeron límites a la contribución de fuentes discretas para explicar dicho fondo de radiación difusa. Las medidas de *Ginga* de los espectros de AGNs en la banda 2-20 keV, en combinación con los datos de SIGMA en *Granat* y de OSSE en *CGRO*, han permitido al polaco Andrzej Zdziarski y colaboradores explicar el fondo de radiación difusa de rayos X en el rango **2-100 keV** con una población de AGNs hasta $z \sim 4$. Según este modelo, los fotones X se han producido por «comptonización» (procesos de efecto Compton inverso) de fotones del rango UV y X blando emergentes del disco de acrecimiento por parte de electrones relativistas, y a su vez, una considerable fracción (50 %) de estos fotones X se ven reflejados en una superficie fría.

CUADRO XIX. IMÁGENES PROFUNDAS DEL UNIVERSO PROFUNDO.

El telescopio de nueva tecnología NTT de 3,6 metros abierto en el Observatorio Europeo de La Silla, en Chile, ha permitido la obtención de la imagen más profunda del Universo al reflejar objetos hasta magnitud



Fig. 126: Porción del Campo Profundo obtenido en 1996 con el Telescopio Espacial Hubble. La posición es AR (2000) = 12 h 36 m 49.4 s, Dec (2000) = +62°12'58". Cortesía NASA/ESA.

29.1. El *Telescopio Espacial Hubble*, también ha logrado alcanzar un límite similar, pero con la ventaja de una resolución espacial 10 veces mejor. La imagen, del *Hubble Deep Field* (HDF) fue obtenida durante 11 días y muestra una sorprendente cantidad de galaxias débiles (figura 126). Al aproximarnos al límite de distancia correspondiente a la edad del Universo, el número de objetos debería disminuir ya que estaríamos observando épocas anteriores a la formación de las galaxias. Pero ambas imágenes, tanto la obtenida por el NTT como por el HST, muestran que dicho número sigue creciendo al menos hasta la magnitud 29. En estos niveles hay ya una preponderancia de galaxias azules (las más brillantes a $z \sim 0,5$) y de objetos de morfología variada, tan distantes como $z \sim 6$, que posiblemente se unieran para formar las galaxias tal como las concebimos en nuestro Universo local. En cualquier caso, y a pesar del enorme avance realizado, aún no hemos llegado al tiempo anterior a la formación de las galaxias. Por otro lado, aún no se conoce el tipo de todas las galaxias que aparecen en la imagen. Si fueran galaxias espirales normales, el brillo aparente que observamos reflejaría una distancia del orden de 15 mil millones de años luz, cerca de la supuesta edad del Universo. Pero si fueran elípticas enanas, estarían a sólo 10 mil millones de años luz y, por el contrario, si fueran más masivas que las espirales, reflejarían una distancia mucho mayor.

Las misiones futuras, los grandes observatorios, *Spectrum X/T*, *XMM* y sobre todo AXAF (ver capítulo VI) permitirán seguramente, aunque esto ya se había dicho antes, resolver definitivamente el problema del origen de la radiación de fondo en rayos X. Por un lado se podrá obtener un espectro que incluya la zona de los rayos X duros, por encima de 10 keV, simultáneamente con el rango de rayos X blandos. Se determinará la distribución energética de las fuentes más débiles, muy por debajo del límite alcanzado por los satélites anteriores, que permitirá discriminar entre las teorías basadas en AGNs con procesos evolutivos o simplemente una clase de objetos completamente nueva. Además, la cobertura de grandes zonas del cielo de forma sistemática y con integraciones suficientemente grandes como para detectar de forma significativa la radiación de fondo, creará una base de datos única para el análisis de variaciones del espectro y anisotropías como resultado de las observaciones puntuales. Con toda seguridad se detectarán una gran cantidad de AGNs de baja luminosidad, hasta unos niveles de 10^{-16} erg cm⁻² s⁻¹, probablemente miles por grado cuadrado, de igual manera a la gran cantidad de galaxias revelada por el *Hubble* con el HDF.



CAPÍTULO 6

VI El futuro de la Astronomía X

El repaso que hemos dado en las dos últimas secciones a las diferentes áreas de investigación en el campo de la Astronomía X, ha puesto de manifiesto la necesidad de continuar, incluso aumentar, las observación de fuentes de rayos X con instrumentos cada vez mejores, con mayor resolución espacial, más sensibilidad y mejor resolución espectral. Al abrir la ventana de los rayos X para el estudio del Universo, nos hemos encontrado con una visión distinta de la que teníamos en el rango óptico. La placidez de los sucesos observados con luz visible, sólo perturbada por algunas explosiones de supernovas o ciertos fenómenos en sistemas binarios con estrellas compactas, ha dado paso a un Universo plagado de fenómenos violentos: gas a cientos de millones de grados, electrones moviéndose a velocidades relativistas en campos magnéticos intensos, ondas de choque producidas por explosiones supernova comprimiendo y calentando el medio interestelar, o estrellas de neutrones y agujeros negros tragándose grandes cantidades de materia arrancadas de una estrella vecina.

Con el fin de seguir investigando este universo violento, en la actualidad (1998), se encuentran en órbita, y observando activamente el cielo en altas energías, los instrumentos a bordo de la misión *Kvant* en la estación espacial rusa *Mir*, el satélite alemán *Rosat*, la misión japonesa *Asca*, el norteamericano *CGRO* así como los satélites más recientes *Rossi XTE* (X-ray timing Explorer), y *BeppoSAX* y, por supuesto, el flamante *Minisat-01*.

La misión *Asca*, de la que ya hablamos en el capítulo III, incorpora dos nuevas tecnologías para la observación de rayos X que mencionábamos como de gran proyección para misiones futuras: los detectores CCD para la obtención de imágenes, y los sistemas focalizadores basados en sistemas de espejos de láminas delgadas. Ambas técnicas habían sido probadas con éxito en la misión japonesa *Yohkoh* (detectores CCD) y la norteamericana *BBXRT* (láminas delgadas). A continuación analizamos la base de funcionamiento de los dos sistemas.

6.1. El uso de detectores CCD

Los sistemas detectores CCD (del inglés *Charge Coupled Devices*), inventados en 1970 por los laboratorios Bell, se están usando desde hace algunos años en todos los instrumentos ópticos para la observación astronómica desde tierra. Estos detectores de estado sólido han sustituido a las placas fotográficas en la obtención de imágenes y espectros, llegando a competir con los fotómetros fotoeléctricos tradicionales para la medida de flujos de radiación en el visible. Las principales ventajas de estos nuevos detectores son su gran sensibilidad, la linealidad de la respuesta en función del flujo de radiación incidente, el comportamiento homogéneo de distintas zonas del detector y la buena amplitud del rango espectral en que pueden ser utilizados. La aplicación espacial de los detectores CCD comenzó también en el rango óptico, con las cámaras a bordo de la misión *Giotto* al cometa Halley, la sonda planetaria *Galileo* o el telescopio espacial *Hubble*.

La idea básica de un detector CCD es muy parecida a algunos de los detectores de estado sólido ya mencionados para el estudio de radiación de alta energía. Se trata de una red de elementos detectores individuales (pixels o «*picture elements*») colocados sobre un soporte delgado de silicio. Al incidir la luz sobre el detector, se producen pares electrón-hueco en cada pixel. En la estructura de soporte se colocan una serie de electrodos que, cuando se les aplican las adecuadas diferencias de potencial de forma secuencial, pueden usarse para controlar las posiciones de los paquetes de electrones y moverlos a lo largo de la red. Una observación comienza con una limpieza de cualquier carga existente en el CCD. Posteriormente se abre el obturador y se expone a la radiación incidente. Cuando se termina la observación y se cierra el obturador, cada pixel ha recibido una cantidad de fotones y ha sufrido una cantidad de cambios proporcional en el número de pares electrón-hueco. Entonces, empieza el proceso de lectura del detector mediante el desplazamiento de la carga de cada pixel al elemento contiguo por columnas verticales. El registro de las cargas se hace en uno de los bordes del detector convirtiendo los valores de cada pixel en dígitos en un ordenador. Al terminar de leer la columna al lado del registrador, se produce un desplazamiento de todas las columnas y se vuelve al proceso de lectura.

En el rango óptico, cada fotón incidente produce un único par electrón-hueco en el detector, por lo que se necesita recoger un gran número de fotones en cada pixel para producir una señal eléctrica medible. Por esta razón los CCD en astronomía óptica se usan como sistemas integradores y para obtener una imagen es preciso realizar exposiciones de varios minutos de duración. Sin embargo, un único fotón X tiene energía suficiente para formar muchos pares electrón-hueco, aproximadamente uno por cada 4 eV de energía del fotón incidente. De esta forma, los CCD en Astronomía X pueden emplearse como contadores de fotones, ya que cada uno de ellos puede producir una señal medible, proporcional a la energía del fotón.

El empleo de los CCD como espectrómetros de rayos X sensibles a la posición, requiere que sólo se produzca el impacto de un fotón incidente por pixel en cada imagen, por lo que los tiempos de exposición han de limitarse a algunos segundos. Además la carga que actúa como señal debería ser recogida completamente dentro del pixel original, sin afectar a los adyacentes, para ser transportada al registro de salida sin pérdidas debidas a una baja eficiencia de la transferencia de carga, y ser medida sin degradación de la señal por ruido del sistema de lectura. Estos requisitos imponen algunas características especiales en la estructura de los detectores CCD que se usan en Astronomía de rayos X

Normalmente, se emplean dos tipos de detectores CCD en Astronomía X. El primero se basa en la utilización de semiconductores de óxidos metálicos (MOS) operando en modo de transferencia de imágenes, como hemos explicado anteriormente. El segundo tipo consiste en la más moderna tecnología de pn-CCDs, que tiene la ventaja de una resolución temporal de las observaciones mucho mayor, que puede llegar a ser de hasta 16 microsegundos (ver figura 127). Éstos últimos tienen una eficiencia cuántica superior al 90 % para energías entre 0,27 y 10 keV, y serán usados en ABRIXASy *XMM*.

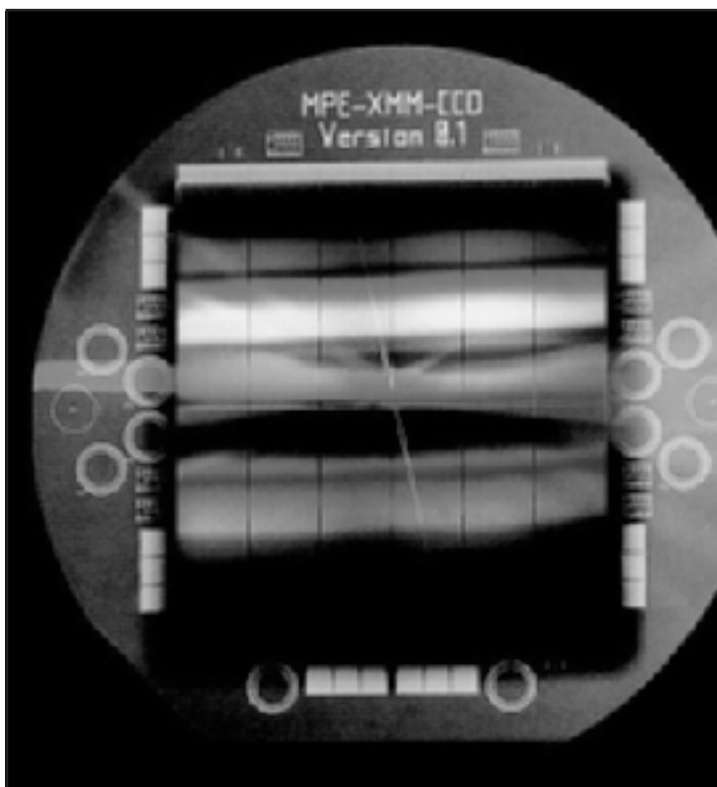


Fig. 127: Una de las grandes CCD tipo pn, de 6 x 6 cm(2) que formará parte de EPIC en el satélite XMM de la Agencia Espacial Europea. 12 chips la conforman. Cortesía del Instituto Max Planck para Física Extraterrestre (Munich, Alemania).

6.2. Telescopios de rayos X con láminas delgadas

Ya hemos comentado en el capítulo III la necesidad de emplear espejos mediante incidencia rasante en dos superficies, paraboloide e hiperboloide, consecutivas para obtener un suficiente grado de focalización de la radiación X. Los mejores telescopios de rayos X se obtienen definiendo la superficie reflectante de acuerdo con los valores teóricos de Wolter tipo 1, con gran precisión, del orden de 5 a 10 Å. Para ello es preciso construir unos soportes rígidos de vidrio de baja expansión térmica, suficientemente gruesos como para proporcionar una superficie no deformable a lo largo de las fases de construcción, pruebas, lanzamiento y operaciones científicas. Estos espejos, lógicamente limitan el número máximo de los que se pueden colocar sobre un mismo eje en un telescopio y el diámetro mínimo del espejo más interno, que como ya sabemos fija el límite superior del rango útil de energías. Un método alternativo para la construcción de espejos de acuerdo con las prescripciones del diseño de Wolter tipo 1, es el uso de réplicas. Esta técnica se está utilizando, especialmente, para misiones en las que se combinan varios telescopios en paralelo para incrementar el área efectiva como veremos que es el caso de la misión *BeppoSAX* o de la futura misión europea *XMM*. En este caso se emplean soportes plásticos especiales, reforzados con fibra de carbono, generados mediante réplica de unos mandriles de vidrio bien pulimentados y sobre los que se deposita una capa reflectante de oro. La capa reflectante se transfiere a la superficie plástica y posteriormente se separa del mandril. Esta separación es ciertamente muy complicada, especialmente para superficies con un ángulo muy pequeño de incidencia rasante. La primera prueba de esta técnica se realizó con los espejos que se fabricaron para el observatorio *Exosat*. La óptica de réplica permite disminuir el espesor de la estructura de soporte y hacer un uso más eficiente del espacio interior de los espejos en el telescopio.

Una posible salida a los problemas planteados en la construcción de telescopios de rayos X podía ser la utilización de superficies cónicas que se aproximasen mucho a las superficies ideales, paraboloides e hiperboloides, del diseño de Wolter tipo 1. Esto puede hacerse si la superficie cónica es suficientemente corta y se pueden llegar a obtener superficies con una desviación de la teórica menor que 20". En este caso, se pueden emplear láminas delgadas de aluminio con superficies suficientemente suaves y cortar sectores de las superficies cónicas para formar la configuración aproximadamente correcta. Posteriormente se cubre la superficie de las secciones cónicas con una capa delgada de un material acrílico que tiende a suavizar la posible rugosidad residual de la superficie. Finalmente, se evapora sobre esta superficie una capa delgada de oro (o iridio) reflectante a los rayos X.

Con esta nueva tecnología, empleada por primera vez en el telescopio BBXRT y que seguirá en *Spectrum X/G*, se consiguen espejos de rayos X de un grosor muy pequeño y se pueden llegar a colocar más de cien espejos anidados dentro de un mismo telescopio (figura 128). Además el menor tamaño del espejo más interno de

la configuración permite aumentar el rango de energías de estos telescopios hasta los 20 keV. A cambio, se obtiene una resolución espacial de sólo unos minutos de arco, mucho peor que con los espejos clásicos.

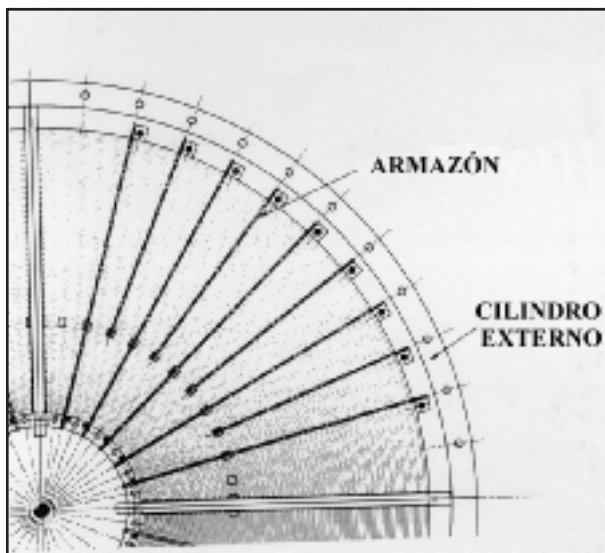


Fig. 128: El sistema de espejos delgados anidados en un cuadrante de SODART, el telescopio principal de Spectrum X/Γ.

6.3. Nuevamente, instrumentos a bordo de misiones pequeñas.

El pequeño satélite americano *Alexis* (*the Array of Low Energy X-ray Imaging Sensors*) fue lanzado el 25 de abril de 1993 por un cohete *Pegasus*. Su carga útil la componen 6 telescopios de gran campo, cada uno algo más grande que una taza de café (figura 129). Los telescopios operan en el límite entre el EUV y los rayos X más blandos, con filtros de banda estrecha centrados en 0,066, 0,071 y 0,095 keV. Esto presupone que sólo puede observar fuentes relativamente cercanas al Sol, con densidades de columna inferiores a 10^{19} átomos/cm².

Algo mayor resultó el satélite americano *Wind*, que dedicado al estudio del viento solar, fue lanzado el 1 de noviembre de 1994. portando dos detectores de rayos gamma cósmicos que operaban en el rango X (figura 130). TGRS es un espectrómetro de germanio, que permite estudiar en el rango 15-10.000 keV, mientras que el segundo experimento (Konus), es una copia de los instalados en alguna nave de la serie *Cosmos*, las *Venera 11-14* y la estación espacial *Mir*.

Por su parte, la Agencia Espacial de la India, ISRO, lanzó el *IRS-P3* (*Indian Remote Sensing satellite*) desde la isla de Sriharikota, el 21 de marzo de 1996. Porta un instrumento para la observación en rayos X (2 - 18 keV), que consiste en un conjunto de tres contadores proporcionales de multicapas que, colimados, proporcionan un campo de $2^\circ \times 2^\circ$, con un área efectiva de 1.200 cm².

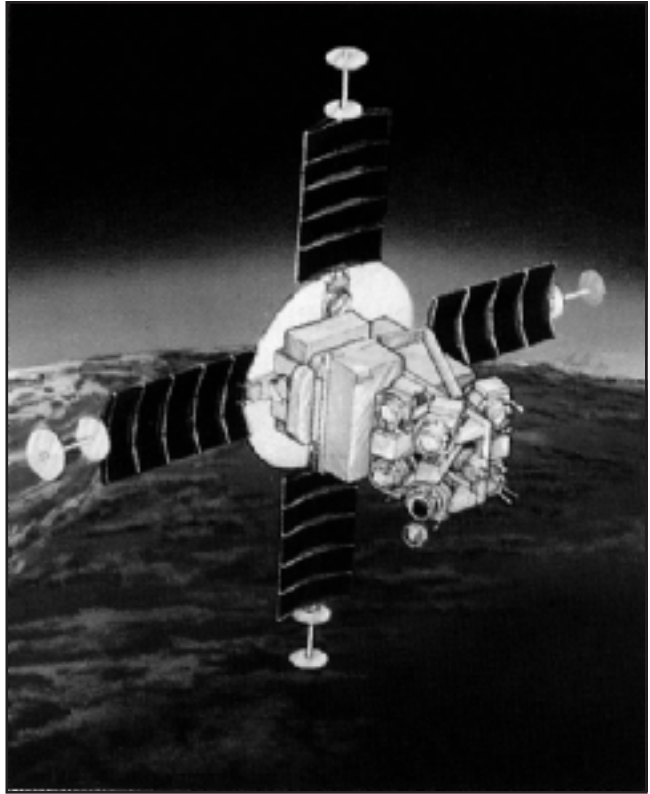


Fig. 129: EL satélite Alexis.

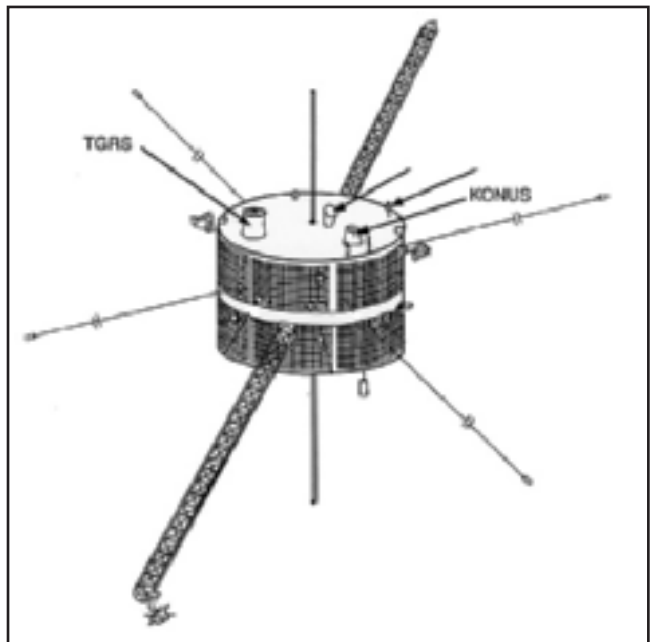


Fig. 130: Esquema del satélite Wind con los instrumentos TGRS y Konus.

LEGRI (*Low Energy Gamma-Ray Imager*) es uno de los tres experimentos que conforman la carga científica del *Minisat-01*, el mini-satélite español lanzado exitosamente el 21 de abril de 1997 por otro *Pegasus* (figura 131). Está diseñado para operar en el rango 10-100 keV, y se compone de una máscara codificada a 1 m de la cual está el detector, que es una matriz de 10 x 10 elementos. De éstas 80 son cristales semiconductores de HgI_2 y los restantes 20 son cristales de CdZnTe . El investigador principal es Victor Reglero. Todos los instrumentos se muestran en la figura 132.



Fig 131: El Minisat 01 en el momento de ser integrado en el lanzador Pegasus XL.

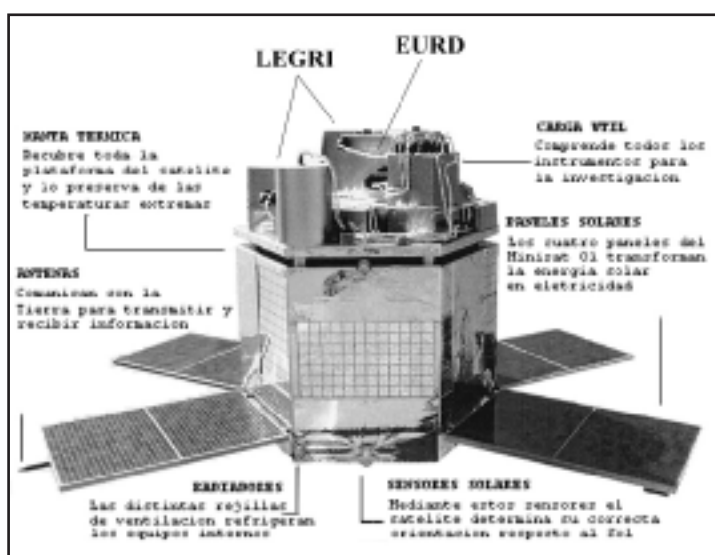


Fig. 132: Esquema del Minisat-01 y su carga útil.

Para este año 1998 está previsto un nuevo vuelo de *Spartan-1* (ver capítulo III). Al experimento, se le ha añadido un colimador y electrónica para medición rápida, y se le ha rebautizado con el nombre de experimento USA (*Unconventional Stellar Aspect*). En la figura 133 se puede ver un esquema de su configuración e irá a bordo del satélite *Argos* (*Advanced Research and Global Observations Satellite*).



Fig. 133: El experimento USA.

6.4. Tres misiones medias y dos pequeñas.

Italia (a través de su agencia espacial ASI) es uno de los países europeos con mayor interés en el desarrollo de experimentos en Astronomía de altas energías y, con la participación de la Agencia Holandesa para Programas Espaciales (NIVR) y la Agencia Espacial Europea, ha desarrollado un ambicioso proyecto para el estudio de los rayos X cósmicos llamado *BeppoSAX* (*Satellite per Astronomia in raggi X «Beppo»*, en honor de Giuseppe Occhialini), lanzado el 30 de abril de 1996 desde Cabo Cañaveral por un cohete *Atlas-Centauro*. La órbita elegida se sitúa a 600 km, con una inclinación de 3° , de modo que puede ser controlada desde Malindi (Kenia). El satélite porta un sistema de cuatro concentradores, o telescopios de rayos X equipados con espectrómetros para su análisis. Los cuatro telescopios son idénticos, basados en un sistema de 30 espejos anidados siguiendo el esquema Wolter 1 con superficies reflectoras de oro, y están alineados sobre el eje de observación pero, mientras un espectrómetro (LECS) mide el rango de baja energía, entre 0,1 y 10 keV, los otros tres (MECS) se dedican al rango entre 1 y 10 keV. Estos sistemas

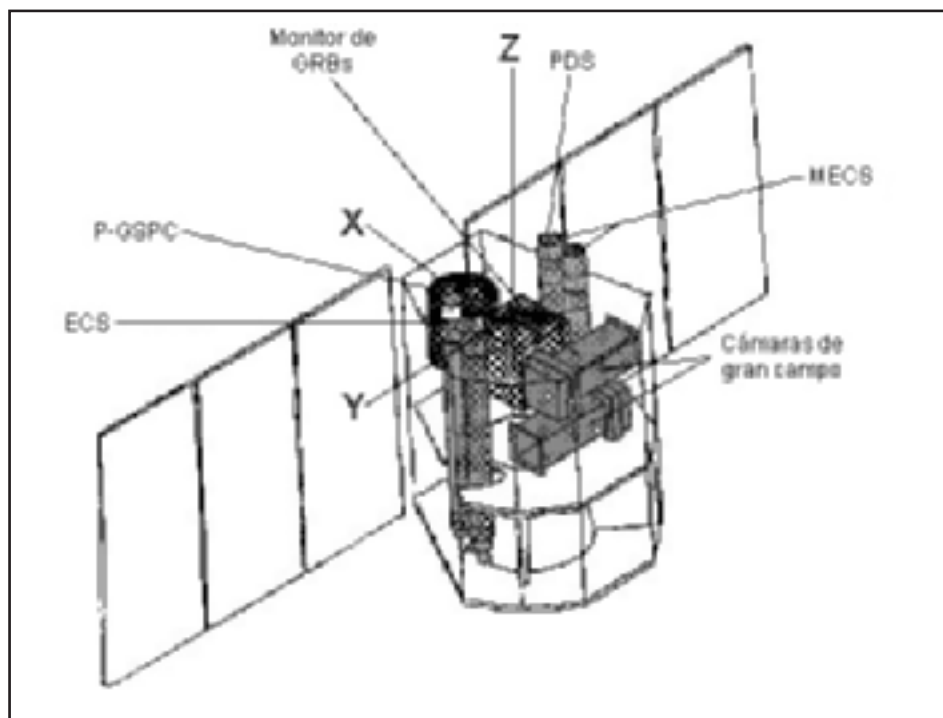


Fig. 134: Esquema del satélite Beppo SAX con toda su instrumentación.

proporcionan una resolución angular de $1'$ y un campo de visión de 1° . Un esquema de los instrumentos se presenta en la figura 134. Asimismo, lleva un contador de centelleo en gas de alta presión (HPGSPC), sensible al rango entre 3 y 120 keV, un centelleador para el rango entre 15 y 300 keV (PDS), y un detector de GRBs, en el rango 40-700 keV (GBM). Por otro lado, en el eje perpendicular al anterior, se disponen observando en direcciones diametralmente opuestas, dos cámaras de campo amplio (WFC) con máscaras codificadas sensibles al rango entre 2 y 30 keV. Estas cámaras, con un área de 250 cm^2 y campo de visión de $40^\circ \times 40^\circ$, permiten hacer un rastreo completo del cielo en rayos X, seguir las variaciones de flujo de largo periodo de algunas fuentes y localizar en el dominio X explosiones cósmicas de rayos gamma como GRB 970228, GRB 970508 y GRB 971214, con una incertidumbre de sólo $3'$ (figura 135). En el primer caso, una emisión intensa de rayos X se detectó tan sólo 8 horas después del evento, disminuyendo en un factor 20 tres días más tarde, lo que permitió relacionar ambos sucesos (lámina 24). Ello constituyó un hito en la búsqueda de contrapartidas de GRBs y de hecho se descubrió por vez primera una contrapartida óptica en imágenes obtenidas con telescopios de Bolonia y La Palma.

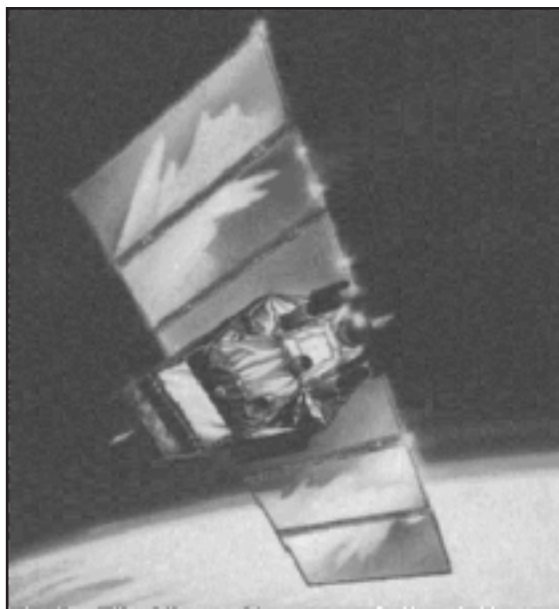


Fig. 135: BeppoSAX en órbita.

CUADRO XX. LA CONTRAPARTIDA OPTICA DE GRB 970508

Desde su descubrimiento en 1967 por los satélites de la serie *Vela* al que ya nos hemos referido con anterioridad, el origen de las explosiones cósmicas de rayos gamma (GRB), es uno de los misterios aún no resueltos en el campo de la Astrofísica. Estas explosiones, a modo de destellos muy intensos en la banda X/γ y con duración de varios segundos, se vienen registrando por término medio una vez al día. El mayor inconveniente radica en que no es posible determinar su procedencia a priori, y lo que es peor, tampoco se pueden localizar en el cielo con una precisión inferior a 1°. El problema reside en identificar cuál es el origen y qué tipo de fuente astronómica da lugar a estas explosiones tan energéticas.

La resolución del misterio ha comenzado a partir de las observaciones realizadas por los instrumentos GBM y WFC de *BeppoSAX*, que está proporcionando posiciones con incertidumbres de 3' de radio, y pueden ser refinadas hasta 1' en caso de detectar la emisión de rayos X (el «*X-ray afterglow*») que sigue, durante algunas horas, al fenómeno.

Una de estas explosiones cósmicas de rayos gamma, de 35 s de duración, aconteció el pasado jueves día 8 de mayo, alrededor de las 11:41 de la noche (hora española), muy cerca de la Estrella Polar. Inmediatamente, en Villafranca del Castillo, en las cercanías de Madrid, donde se ubica el Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental (LAEFF) del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), se recibió una llamada procedente de Italia. Javier Gorosabel, que trabajaba hasta altas horas de la madrugada en el

laboratorio, pudo alertar esa misma noche a los astrónomos españoles que estaban trabajando en el Telescopio William Herschel en la isla de La Palma. Allí, Enrique Martínez González, Narciso Benítez y Myriam Centurión, obtuvieron las primeras imágenes (en luz azul) del objeto en el que se originó la explosión de rayos gamma, antes de que ningún otro astrónomo en todo el mundo lo lograra. Tan sólo cuatro horas después de la explosión gamma, las imágenes mostraban el objeto con magnitud $U = 20.3$ (ultravioleta, figura 136). Todo una gesta en este tipo de búsquedas. Simultáneamente fueron alertados los alemanes Christian Wolf y Ralf Fockenbrock -quienes también colaboran con el grupo del LAEFF- y que observaban en el telescopio de 2,2 metros del Observatorio Hispano-Alemania de Calar Alto (Almería). Las imágenes que ellos obtuvieron en el filtro R (rojo) mostraron que el objeto era muy azul ($U - R = -0.8$), como se esperaba de la contrapartida óptica del GRB, ya anunciado por el americano Howard Bond, quien había podido constatar la presencia del objeto aumentando de brillo gradualmente.

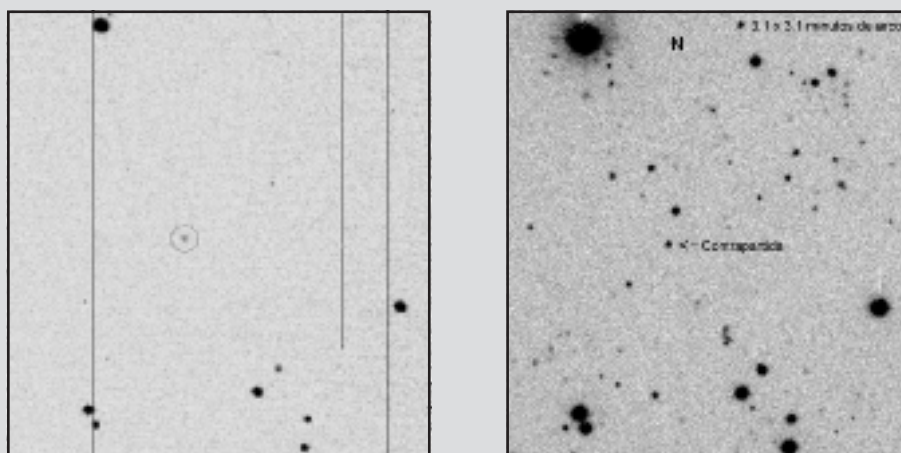


Fig. 136: Parte izquierda: imagen en la banda U de la zona de error del GRB obtenida con el telescopio William Herschel de 4.2-m de La Palma la noche del 8 al 9 de mayo, tan sólo 5 horas después de la explosión en rayos gamma. La contrapartida óptica aparece inscrita en el centro de la imagen. Parte derecha: imagen del GRB obtenida con el Telescopio de 2,2 m de Calar Alto, obtenida simultáneamente en la banda R. Nótese como el objeto emite fuertemente en el ultravioleta.

Las observaciones se repitieron la madrugada siguiente (día 9) y en la noche del sábado 10, y desde Calar Alto, Wolf, Fockenbrock y Castro-Tirado, tomaron un espectro óptico de la fuente gamma, el primero que se conseguía en todo el mundo. Sin embargo, la relación señal/ruido no era la suficientemente alta, de modo que el americano Mark Metzger y colaboradores obtuvieron desde Hawaii horas después otro espectro óptico de mejor calidad, mostrando un sistema de líneas de absorción del que se deriva $z > 0.835$. Un segundo espectro tomado

un mes después detectó [O II] en emisión. Ello confirma que GRB 970508 se encuentra a unos 7.000 millones de años luz de nosotros, a la cuarta parte del universo observable.

Hasta la fecha, y desde el punto de vista teórico, se habían considerado dos tipos de modelos: GRBs en un halo galáctico extenso (con un radio de al menos 500.000 años-luz) o GRBs a distancias cosmológicas, es decir, a distancias superiores a varios miles de millones de años-luz. Los resultados aquí descritos confirman que una fracción sustancial de GRBs, si no todos, están muy lejanos. De modo que por unos segundos, el GRB brilló 100 veces más que toda una galaxia con sus cientos de miles de millones de estrellas.

La misión norteamericana *Rossi XTE* (*X-ray Timing Explorer*, bautizado «Rossi» en honor de Bruno Rossi, uno de los padres de la Astronomía X, fallecido en 1993) fue lanzada al espacio el 30 de diciembre de 1995. Es un pequeño observatorio (figura 137) que lleva un sistema de contadores proporcionales de gran área efectiva con un nivel de ruido especialmente bajo con el fin de estudiar fuentes de radiación X variable en el rango de energías entre 2 y 200 keV. Asimismo lleva detectores de estado sólido para altas energías y un monitor de campo amplio para la observación de todo el cielo en busca de fuentes transitorias. La resolución espectral es moderada en el amplio rango de energías al que son sensibles los instrumentos, pero pueden efectuarse estudios temporales en un rango

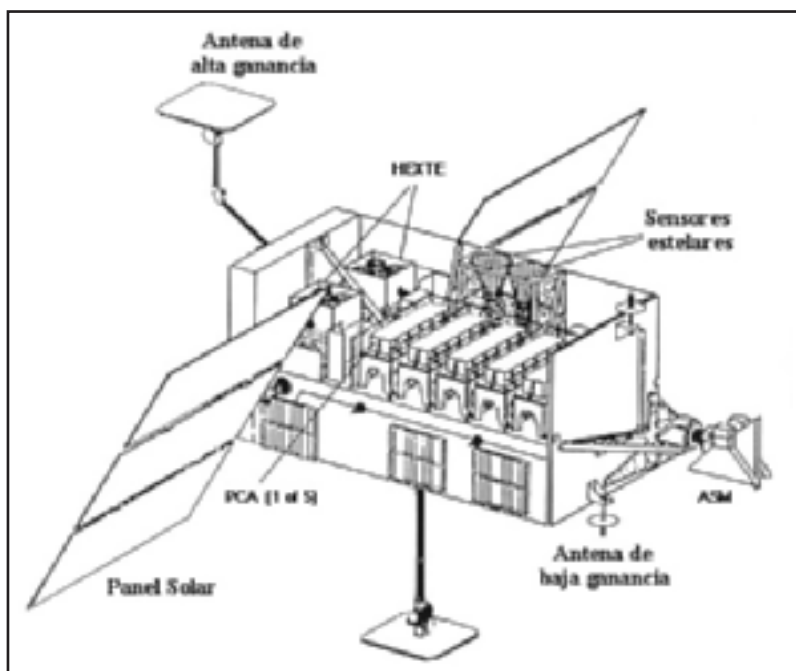


Fig. 137.
Esquema del
satélite Rossi
XTE.

de variaciones no explorado desde 10 microsegundos hasta varios años. Ésta es su característica más importante. Uno de los instrumentos lo constituyen cinco contadores proporcionales de gran área, basados en los del HEAO-1. Los cinco conforman el llamado experimento PCA, cubriendo el rango entre 2 y 60 keV. Un segundo instrumento es el HEXTE, un conjunto de detectores de centelleo que extienden la sensibilidad de *Rossi XTE* hasta los 200 keV. El campo de visión de ambos instrumentos es de 1° . Aparte de ello, posee un monitor de rayos X, el ASM, con el que se cubre un campo de $0,2^\circ \times 1^\circ$, en el rango de energías 2-10 keV. Entre sus últimos resultados se encuentra la detección de oscilaciones cuasi-periódicas en GRS1915+105 (figura 138). Además, el análisis por parte de los italianos Luigi Stella y Mario Vietri de 15 estrellas de neutrones observadas por RXTE ha permitido comprobar otra de las predicciones de la Teoría de la Relatividad General de Einstein (1915), que consiste en el arrastre y retorcimiento de la porción del espacio-tiempo circundante por la enorme gravedad de la estrella de neutrones conforme esta gira sobre sí misma. Es el llamado efecto Lense-Thirring («*frame dragging*») en honor de los físicos austriacos que en 1918 postularon este efecto. Un equipo formado por Wei Cui, Shuang Zhang y Wan Chen, basándose en las investigaciones del equipo italiano, ha extendido los resultados a 5 agujeros negros, donde la evidencia parece ser aun más fuerte.

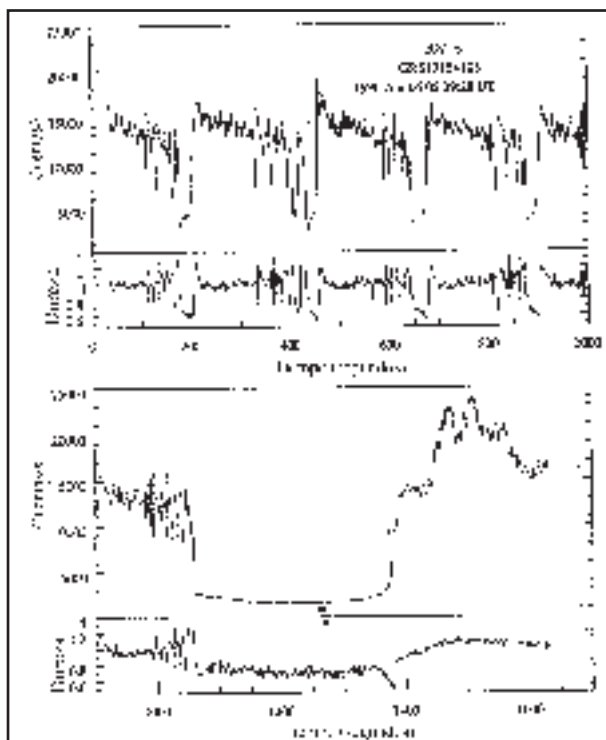


Fig. 138: El peculiar comportamiento de GRS1915+105, el día 5-4-96. Después de la caída del flujo X, este se recupera rápidamente, y en cuestión de 2 minutos, comienzan las oscilaciones.
De J. Greiner et al. *Astrophysical Journal*, 473, The American Astronomical Society, The University of Chicago Press, L109. (1996)

ABRIXAS (A BRoad band Imaging X-ray All-sky Survey) es un pequeño satélite alemán que será lanzado en 1999, con el objetivo científico de realizar un monitoreo del cielo X similar al realizado por *Rosat* durante seis meses en 1990, pero esta vez durante tres años y en la banda 0,4-12 keV, con una resolución angular mejor que $1'$ (figura 139). Lo componen 7 telescopios con 27 espejos anidados cada uno, siguiendo el diseño de tipo Wolter I. Los telescopios tienen distintas orientaciones entre sí, empleando CCDs de $6 \times 6 \text{ cm}^2$ como detectores, lo que les confiere un campo de $30'$. Se calcula que observará unas 60.000 fuentes, como en el caso de *Rosat*.

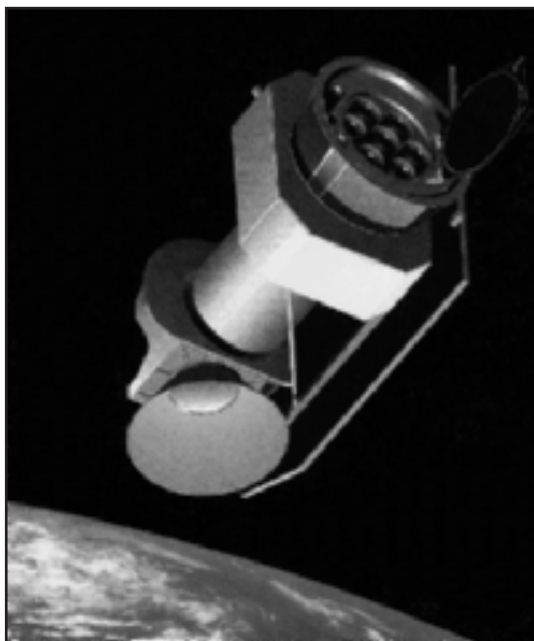


Fig. 139: Concepto de la misión ABRIXAS.

Uno de los pocos satélites en los que ha habido una participación masiva de estudiantes ha sido *CATSAT*, desarrollado por varias instituciones norteamericanas, entre ellas la NASA. El lanzamiento está pensado para 1998. Consiste en un pequeño satélite que tiene como objetivo el estudio de las explosiones cósmicas de rayos gamma (GRBs). El principal objetivo es determinar el espectro en la zona de los rayos-X blandos para así determinar el valor de la columna de hidrógeno que nos proporciona la absorción en la dirección de la fuente. Porta cuatro instrumentos (Figura 140). SXR (*Soft X-ray spectrometer*) es un espectrómetro para rayos-X suaves, basado en 6 grupos -colimados- de detectores de silicio (PIPS, cada uno de ellos teniendo 36 detectores individuales de 1 cm^2 cada uno). Abarca el rango de energías de 0,5 a 20 keV. DGS (*Directional Gamma-ray Spectrometer*) es el espectrómetro direccional de rayos-gamma, basado en centelladores de

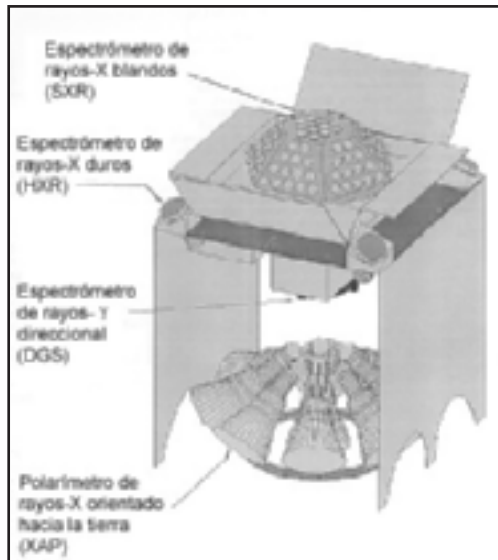


Fig. 140: Esquema de CATSAT mostrando los diferentes instrumentos.

NaI(Tl), dentro del rango 100 keV-1 MeV. XAP (*X-ray Albedo Polarimeter*) es un instrumento que, con un campo de visión de 45° , consiste de 9 detectores de NaI que están orientados hacia la Tierra. El objetivo es la detección de los rayos gamma que son difundidos por la atmósfera de la Tierra. Ello proporciona una mejor idea de la localización del GRB. El último instrumento es HXR (*Hard X-ray Spectrometer*), un espectrómetro de rayos-X duros para la banda 20-200 keV. Están basados en centalladores de CaF_2 .

HETE-2 (the High Energy Transient Explorer) es el segundo intento de situar -para finales de 1999- este ingenio en el espacio, después del lanzamiento fallido de *HETE-1*, por Pegasus, en noviembre de 1996. Es una misión internacional en la que participan Estados Unidos y, en menor medida, Japón, Francia e Italia. El principal objetivo es la detección -para variar- de GRBs, pero en este caso en tiempo real, a un ritmo de unos 30 cada año. Al ser ésta la motivación principal, el satélite, de reducido tamaño (Figura 141) cuenta con instrumentos sensibles al rango X/γ. Estos son: el espectrómetro de rayos gamma multidireccional, FREGATE (*French Gamma Telescope*), el monitor de gran campo WXM (*Wide-Field X-ray monitor*) y la cámara de rayos-X blandos, SXC (*Soft X-ray Camera*). FREGATE se basa en el experimento LILAS que viajó a bordo de *Phobos*. No es otra cosa que un centallador de NaI(Tl) con 120 cm² de área, que opera desde 6 keV hasta más de 1 MeV. WXM consiste de dos detectores sensibles a la posición sobre los cuales se sitúa una máscara codificada. El rango de energías cubierto es 2-25 keV. SXC, a la vista de los resultados de *BeppoSAX*, sustituye a las antiguas cámaras ultravioletas, originariamente diseñadas para HETE-1. Consiste en 6 detectores CCD, 4 de ellos en el rango X de 0,5 a 14 keV. Los dos restantes en el óptico. Se espera detectar los GRBs más intensos con una precisión de 3".

Fig 141. HETE-2 pasando unas pruebas en la camara limpia. Nótese el reducido tamaño.



6.5. Una nueva generación de grandes misiones de rayos X

Aparte de la misión *Spectrum X/T*, para el futuro se espera el desarrollo de una tercera generación de observatorios astronómicos de rayos X en órbita que incrementarán la sensibilidad de los instrumentos en más de un orden de magnitud respecto de los actualmente existentes. Estos equipos deberán ser capaces de estudiar en detalle tanto los cuásares más lejanos y las galaxias activas en los confines del Universo como las emisiones coronales de las estrellas más débiles de nuestra galaxia. La NASA ultima la puesta en órbita del proyecto *AXAF* (*Advanced X-ray Astrophysics Facility*) dentro del conjunto de grandes observatorios en órbita baja, con los que pretende cubrir todo el espectro electromagnético y cuya componente en el rango óptico y ultravioleta es el famoso *Telescopio Espacial Hubble* (HST) lanzado en 1990; y a más altas energías, para radiación gamma, es el *Observatorio Compton de Rayos Gamma* (CGRO), lanzado en 1991. *AXAF* dispondrá de un conjunto de espejos de incidencia rasante anidados con una distancia focal de 10 m que permitirán tomar imágenes de fuentes muy débiles con una resolución angular entre $0'',5$ y $1''$, con lo que la Astronomía de rayos X pasará a gozar de una situación comparable a la de la Astronomía óptica desde tierra. Por su parte, la Agencia Europea del Espacio (ESA) prepara la misión *XMM* con un diseño de espejos múltiples y distancia focal de 8 m que pretende complementar los resultados de *AXAF* mediante una mayor sensibilidad a costa de una menor resolución angular. Los tres proyectos van a ser colocados en órbita antes del final de este siglo. A continuación detallamos cada uno de ellos.

6.6. El observatorio ruso *Spectrum X/T*

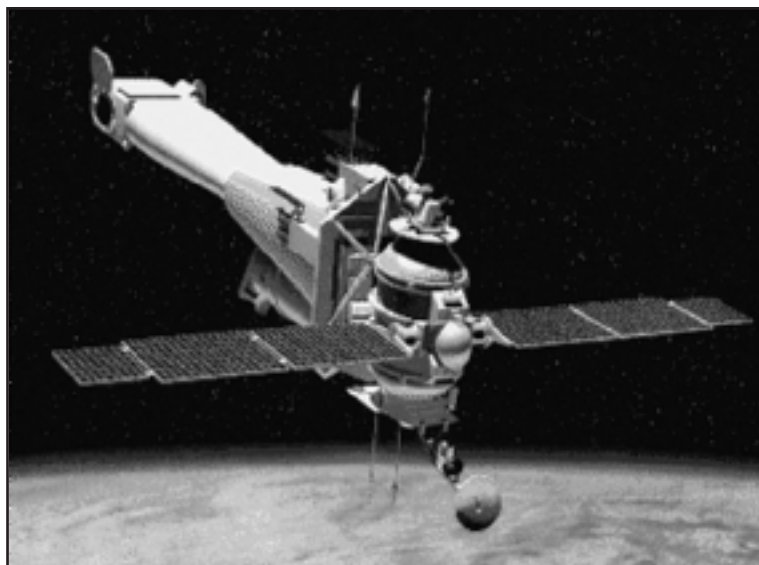
Spectrum X/T es la primera misión de una serie de observatorios para la investigación astrofísica que desarrolla el Instituto de Investigaciones Espaciales de la Federación Rusa, como continuación de los trabajos emprendidos por la Academia de Ciencias de la Unión Soviética con la colaboración activa de un

buen número de países occidentales. Entre estos programas se encuentran, además del *Spectrum X/Γ*, el proyecto *Radioastron* dedicado a la interferometría de gran base (VLBI) desde el espacio y el *Spectrum UV* para la observación en el rango ultravioleta de longitudes de onda. La componente común de estas misiones es la utilización de una plataforma o módulo de servicios igual para todas ellas, desarrollada a partir de programas anteriores de la Unión Soviética en el campo de los satélites de comunicaciones. El propósito de la misión *Spectrum-X/Γ* es aprovechar las tecnologías existentes de concentración de rayos X y detectores, para la puesta en órbita de un observatorio de características similares a los grandes observatorios X, haciendo uso de los medios de lanzamiento y desarrollo de plataformas existentes todavía en Rusia. La necesidad de involucrar a los países occidentales en el desarrollo de la industria espacial en la extinta Unión Soviética, hace imprescindible la continuación de un programa que permita colocar en órbita terrestre equipos científicos. Lo contrario sería abandonar sin más uno de los campos más avanzados y prometedores de Rusia. Ya hemos hablado del satélite astronómico *Granat* con varios telescopios de rayos X a bordo, en colaboración con diferentes países, que representó un tremendo éxito para el estudio del centro de nuestra galaxia y el descubrimiento de nuevas fuentes de rayos X. A pesar de las dificultades actuales que encuentra la investigación espacial en Rusia desde el punto de vista económico y de estructuras, el proyecto *Spectrum X/Γ* sigue sus pasos -no sin dificultades- que le llevan a un lanzamiento desde la base de Baikonur previsto para 2000.

Junto con la misión japonesa *Asca* y la europea *BeppoSAX*, *Spectrum X/Γ* tenía previsto cubrir el tiempo que queda entre la terminación de la misión *Rosat* y la puesta en órbita de los grandes observatorios de rayos X por parte de la NASA (*AXAF*) y la ESA (*XMM*). Ahora, se espera que *Spectrum X/Γ* sea contemporáneo con ambas misiones pero contribuirá de forma fundamental a la Astronomía de rayos X proporcionando información de características únicas. Por ejemplo, los detectores a bordo de *Spectrum X/Γ* serán más rápidos gracias a la mayor área colectora efectiva de sus telescopios y además serán más eficientes en el rango más alto de energías X, entre 10 y 20 keV, que *AXAF* o que *XMM*. La misión *Spectrum X/Γ* (figura 142) será colocada en órbita excéntrica con un periodo de cuatro días. La plataforma está desarrollada en Rusia pero casi todos los instrumentos, incluidos los telescopios de rayos X, son desarrollados en Europa y en Estados Unidos. El propósito principal de la misión es obtener imágenes y espectros de alta calidad y junto con la norteamericana *AXAF* supone la aportación de los primeros grandes observatorios de rayos X después de la misión norteamericana *Einstein*, es decir, abre la era de los grandes observatorios que será continuada por la *XMM* europea.

El experimento SODART, proporcionado por Dinamarca, es el instrumento principal de la misión. Consiste en dos telescopios idénticos de 60 cm de diámetro y 8 m de distancia focal basados en la aproximación cónica al diseño ideal sobre

Fig. 142: Concepto de Spectrum X/Γ en órbita. Cortesía de Sandia National Laboratories y H. Schnopper.



láminas delgadas de aluminio recubiertas por una superficie reflectora a los rayos X que inciden de forma rasante, similar al sistema utilizado en el BBXRT, pero con una abertura mucho mayor y respuesta hasta los 20 keV. Esto se consigue empleando 143 espejos diferentes anidados uno sobre otro, de 0,4 mm de espesor, cómo mostrábamos en la figura 128. La resolución espacial lógicamente no es muy buena, sólo del orden de $2'$. Como instrumentos, los telescopios SODART llevarán dos contadores proporcionales de tipo MSPC sensibles a la posición para los rangos de energías bajas (0,5-3 keV, LEPC) y altas (2-20 keV, HEPC) energías. Los MSPCs (*MicroStrip Proportional Counters*) son contadores proporcionales en los cuales los alambres convencionales han sido reemplazados por tiras conductoras que constituyen los electrodos, generándose éstos sobre el sustrato y empleando técnicas fotolitográficas. También en el plano focal se sitúan: un detector enfriado de obleas de silicio (SIXA), un espectrómetro (KFRD) y un polarímetro (SXPP). Como complemento figuran un panel de Bragg (OXS) para espectroscopía de alta resolución en el objetivo de uno de los dos telescopios, así como el pequeño instrumento israelí TAUVEEX. Es interesante notar que el sistema de almacenamiento de datos de los contadores proporcionales de los telescopios SODART fue inicialmente desarrollado por un grupo de científicos e ingenieros españoles en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Además el INTA ha realizado los ensayos de calificación de los telescopios y los contadores proporcionales.

Por otro lado, la misión *Spectrum X/Γ* también incorpora otros instrumentos (figura 143), cubriendo el rango desde el ultravioleta hasta rayos gamma, entre ellos un telescopio de rayos X, construido básicamente en el Reino Unido, denominado JET-X con óptica clásica de superficies paraboloides e hiperboloides que proporciona una resolución espacial de unos 20" y campo de 40' sobre un sistema de detectores en el plano focal basados en CCDs. Los otros tres son MART-LIME, colaboración italo-rusa, que consiste en un telescopio que opera en el rango 5-150 keV y posee un campo de 6°, con resolución de 9", el experimento americano MOXE, un conjunto de seis detectores que permitirán escudriñar casi todo el cielo X en la banda 2-25 keV con 1° de resolución y posibilidad de detectar fuentes tan débiles como 7 mCrab en 1 día, y FUVITA, un telescopio UV (91-120 nm) con un campo de visión algo superior a 1°.

Objetivos de la misión *Spectrum X/Γ* son obtener espectroscopía de alta resolución de fuentes astronómicas de rayos X, imágenes de rayos X con resolución angular del orden de 20" y observaciones de un rango muy amplio de energías, entre 0,004 y 150 keV. Se espera alcanzar un nivel de detección del orden de $3 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en la parte blanda de los rayos X, realizando un seguimiento continuo de todo el cielo en rayos X gamma para la detección de fenómenos transitorios y explosiones.

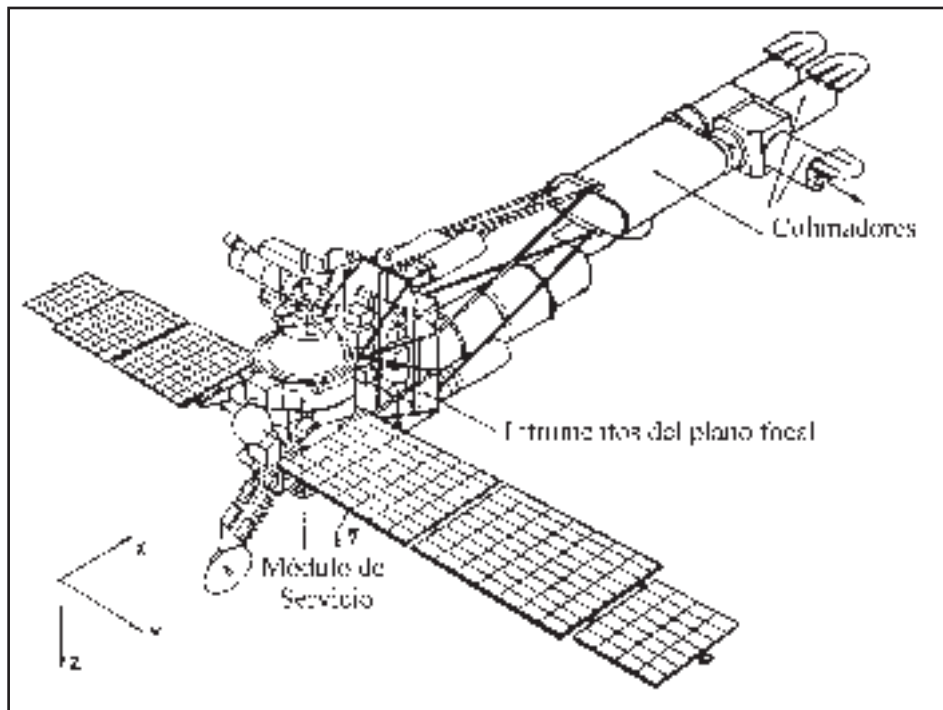


Fig. 143: Configuración de los distintos instrumentos en el *Spectrum X/Γ*.

6.7. La continuidad japonesa: Astro-E y Solar-B

Astro-E será el quinto satélite japonés dedicado a Astronomía X, y será lanzado por el vehículo M-V en el año 2000. Este cohete puede poner cargas en órbita casi tres veces más pesadas que su antecesor, el M-3S que portaba a *Ginga* y *Asca*. Con 5 telescopios de distancia focal de 4,5 m, *Astro-E* incluirá tres experimentos:

1) XRS (*X-Ray Spectrometer*), formado por un conjunto de microcalorímetros en el plano focal de uno de los telescopios que será dedicado a espectroscopía X. Digamos que en un microcalorímetro, después de absorberse un fotón de rayos X, el resultado neto es un pequeño incremento de temperatura que depende de la energía del fotón y de las propiedades térmicas del material absorbente. Este cambio de temperatura puede medirse si el material se mantiene a muy baja temperatura para evitar el ruido de fondo térmico de los fotones en el detector. Hablaremos más detenidamente de ellos al final del capítulo. Actualmente se pueden construir detectores de este tipo que proporcionan una excelente resolución espectral, de 12 eV en el caso de XRS. El área efectiva es de 400 cm² a 6 keV.

2) XIS (*X-ray Imaging Spectrometer*), con cámaras CCDs en el plano focal de tres de los telescopios de rayos X, y cada uno con su correspondiente cámara CCD. Tanto XIS como XRS cubren el rango 0,4-10 keV, siendo el caso de XIS la resolución espectral de 120 eV.

3) HXD (*Hard X-ray Detector*), en el telescopio restante. Es un detector de rayos X duros, integrado por una combinación de contadores formados por un doble centellador de BGO y GSO, cubriendo el rango de energías de 10 a 700 keV.

Solar-B será la siguiente misión de ISAS que sustituirá a *Yohkoh*. Aparte de Japón, participan Alemania, Estados Unidos e Inglaterra. Porta instrumentación para estudiar el Sol en el EUV, óptico y X. En el rango de los rayos X, cuenta con un telescopio que proporcionará una resolución de entre 1 y 2.5" en la banda 0.4-5 keV, y también con un espectroheliógrafo XUV que operará entre 0.04 y 9 keV. Los objetivos científicos son: el estudio de la creación y destrucción de los campos magnéticos solares, la modulación del flujo solar, la producción de radiación UV y X como consecuencia de la reconversión de energía magnética en la cromosfera y en la corona, y la expansión y erupciones de la corona solar. Su lanzamiento se prevé para el año 2004.

6.8. El programa AXAF de la NASA

La misión *AXAF* es la propuesta de la agencia norteamericana para finales de este siglo en el campo de los rayos X y representa la continuación lógica del observatorio *HEAO-2 (Einstein)*, que voló entre 1978 y 1981, pero mejorando de forma significativa la sensibilidad y resolución de los instrumentos. De hecho se propuso inicialmente en 1976 como un telescopio de 1,2 m, ¡22 años antes de su lanza-

miento! La misión se engloba dentro del programa de cuatro grandes observatorios para cubrir un gran porcentaje del espectro electromagnético con plataformas en órbita de larga duración. Como ya hemos comentado el primero de estos grandes observatorios ha sido el *Hubble*, que a pesar de los problemas encontrados en la fabricación del espejo principal, constituye una de las herramientas más potentes de la astrofísica moderna. El segundo de la serie es la misión para altas energías denominada *CGRO* (*Compton Gamma Ray Observatory*) y que es hoy día un gran éxito en la exploración del Universo más energético. El rango intermedio entre ambas misiones, los rayos X, pretenden cubrirse con la misión *AXAF* (*Advanced X-ray Astrophysical Facility*) y la serie terminará en el 2002 con el observatorio infrarrojo *SIRTF* (*Space InfraRed Telescope Facility*).

La misión *AXAF* (figura 144) es muy ambiciosa pero también muy costosa. Pretende poner en órbita un observatorio de rayos X con capacidad para obtener imágenes de alta resolución espacial, por debajo de 1", una gran resolución espectral y una sensibilidad muy superior a la de los detectores puestos en órbita hasta ahora, entre cien y mil veces más sensible que *Einstein*. El rango espectral cubierto por los instrumentos será de 0,1 a 10 keV. Lamentablemente, durante los últimos años han tenido lugar muchos recortes presupuestarios en la NASA y uno de los programas en sufrirlos ha sido precisamente *AXAF*. En lugar de lanzar un gran observatorio como estaba previsto, la NASA propuso en 1992 poner en órbita dos misiones más pequeñas para llevar a cabo las observaciones espectroscópicas y la obtención de imágenes de rayos X por separado. Los costes financieros de lanzar dos misiones pequeñas son sensiblemente menores que los de una única misión grande por el crecimiento exponencial del coste de una misión espacial, como ocurre con el precio de los telescopios en función de su diámetro.

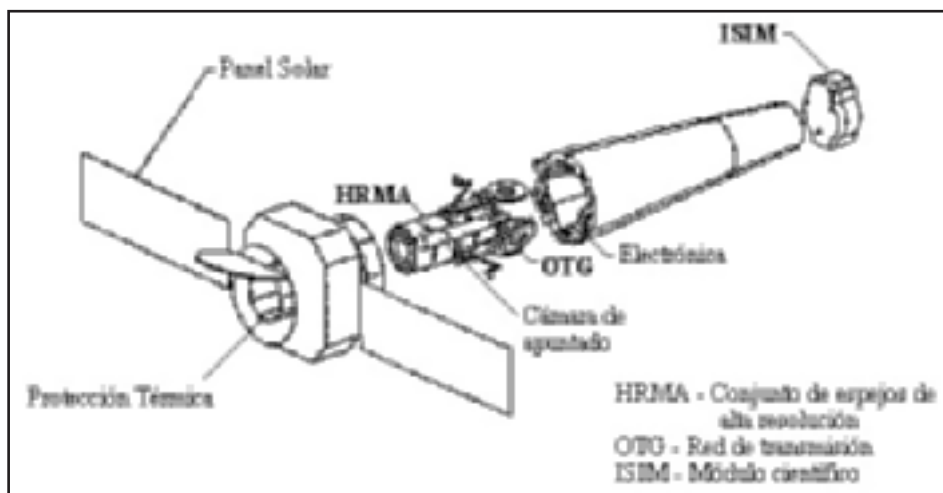


Fig. 144: Esquema de la misión AXAF. (Cortesía NASA)

La misión AXAF-I se concentrará en la obtención de imágenes de alta resolución en rayos X así como espectroscopía mediante redes de dispersión. Su lanzamiento está previsto para diciembre de 1998 y volará en órbita alta alrededor de la Tierra con el fin de incrementar el tiempo útil disponible para observaciones astronómicas, llegando a poder observar un mismo objeto durante 24 h seguidas gracias a su apogeo a 100.000 km. Estaba previsto dedicar la misión AXAF-S a la obtención de espectros de rayos X con gran resolución espectral mediante un nuevo sistema de espectrógrafo con enfriamiento criogénico, sin embargo, AXAF-S fue suspendida como misión en 1993.

El telescopio de rayos X diseñado para la misión *AXAF* original ha sido reducido de seis a cuatro espejos concéntricos de tipo Wolter 1, de 10 m de distancia focal, aunque su eficiencia se ha aumentado mediante la técnica de fabricación prevista, compensando parcialmente el área colectora. La misión original tiene cuatro instrumentos principales (figura 145): dos detectores de imágenes (HRC y ACIS) y dos redes de transmisión (HETG y LETG). HRC está basado en placas microcanal y proporcionará imágenes de muy alta resolución espacial de $0'',5$ en el rango 0,1-10 keV. El campo de visión será de $31'$, llegando a ser 20 veces más sensible que *Rosat*. ACIS es un espectrómetro, formado por un conjunto de 4 CCDs de 1024×1024 píxeles, con resolución de 55 eV a 1 keV (124 eV a 5.9 keV). HETG operará en el rango 0,4-10 keV, mientras que LETG lo hará en el dominio 0,08-4 keV, con resoluciones espectrales $E/\Delta E = 60-1.000$ y 40-2.000 respectivamente.

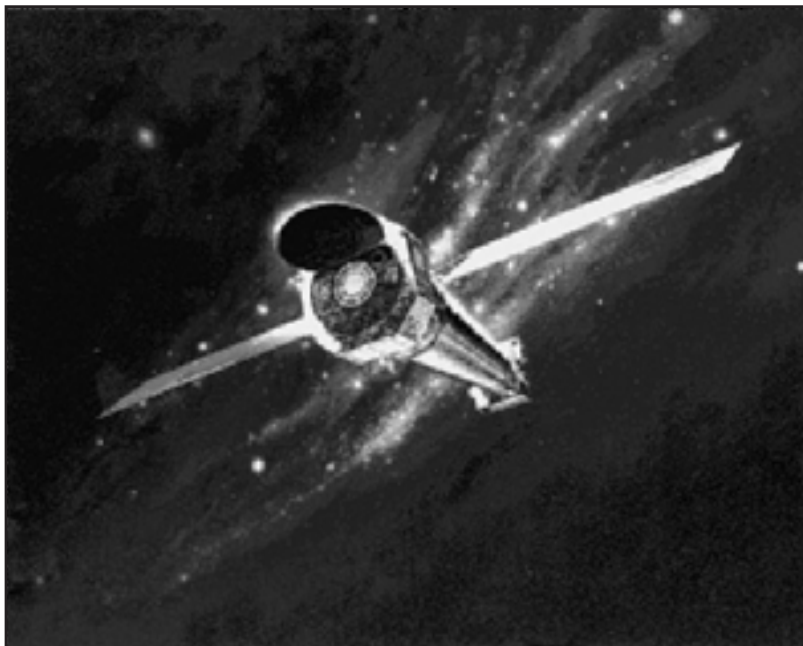


Fig. 145: Una idea de la apariencia de AXAF en el espacio. (Cortesía NASA)

6.9. La aportación europea a los grandes observatorios de rayos-X: XMM (e INTEGRAL)

Después del éxito de la misión *Exosat*, la Agencia Espacial Europea no podía quedar fuera de los ambiciosos programas de grandes observatorios para la exploración del Universo en rayos X, que se estaban planificando en los diferentes países. Así se gestó el programa *XMM* (*X-ray Multimirror Mission*) con un área colectora efectiva sin precedentes y una gran resolución espectral y temporal a costa de hacer menor énfasis en la resolución espacial como es el caso de *AXAF*. De esta forma se complementaban perfectamente las misiones europea y americana. La misión *XMM* forma parte del programa a largo plazo de la Agencia Espacial Europea conocido con el nombre de *Horizonte 2000*. Este programa de investigación científica desde el espacio. Se basa en cuatro misiones importantes denominadas «cornerstones» o pilares de la planificación y una serie de misiones menores que se seleccionan de forma competitiva y dan flexibilidad al programa. *XMM* es la segunda misión «cornerstone» del Horizonte 2000 de la ESA, después del programa de investigación de la interacción Tierra-Sol que llevan a cabo las misiones *Soho* y -pronto- *Cluster-2* (*Phoenix*).

Los tres telescopios que están previstos para el *XMM* son de tipo Wolter 1, con una distancia focal de 7,5 metros, y 58 espejos anidados cada uno, sensibles hasta energías de 10 keV (ver figura 146). Los instrumentos en el plano focal incluyen tres cámaras CCD para imágenes (EPIC) y dos espectrómetros mediante redes de dispersión reflectantes (RGS). Las cámaras se basan en una red de varios chip CCD cada una, dos de ellas utilizando 7 CCDs tipo MOS (600 x 600 píxeles) y la tercera utilizando un mosaico de 12 pn-CCDs de 64 x 200 píxeles. Además, la misión *XMM* prevé la instalación de un monitor óptico y ultravioleta para la observación simultánea en estos rangos del espectro electromagnético (entre

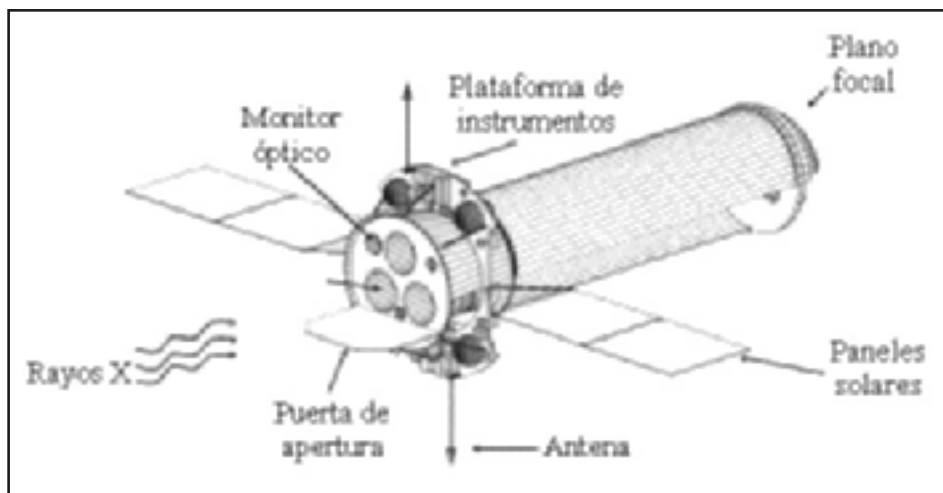


Fig. 146: Esquema de XMM. (Cortesía ESA)

1.500 y 10.000 Å) de las fuentes estudiadas en rayos X. Este monitor consiste en un telescopio tipo Cassegrain de 30 cm de abertura que permitirá observar un campo de 8' con una resolución espacial de 1" mediante un sistema redundante de contadores de fotones a la vez que el campo completo de visión, de 30', será observado con una resolución de 4" con un detector CCD enfriado. Para simultanear los dos tipos de medidas, el monitor óptico divide el haz mediante un espejo dicróico.

La resolución espacial de las imágenes en rayos X será de 20" en un campo de visión de 30'. Sin embargo la sensibilidad de los instrumentos permitirá detectar fuentes hasta diez veces más débiles que las encontradas al límite de detección de la misión *Rosat*. El poder de resolución de los detectores en modo espectrofotométrico de banda ancha varía entre 5 y 60 veces la energía del fotón incidente en función de ésta, lo que permite resolver las líneas K de los complejos hidrogénicos y tipo helio de los elementos más pesados. Por otro lado, los espectrógrafos instalados en el plano focal proporcionarán datos con una resolución entre 100 y 600 sobre el rango espectral entre 5 y 35 Å. Para ello, dispondrán de una red que difractará aproximadamente el 40% del haz de rayos X hacia un foco secundario, con una serie de CCD tipo MOS en configuración lineal como elemento de lectura que proporciona una resolución en energías del orden de 100 eV. Finalmente, es interesante recordar que, gracias al lanzador europeo *Ariane 5*, el observatorio *XMM* se colocará en una órbita excéntrica lo que permitirá la observación continuada de fuentes de rayos X durante tiempos de hasta 42 horas. La contribución más importante de *XMM* será la aportación de una mayor sensibilidad a pequeños flujos de rayos X (hasta $7,5 \times 10^{-15}$ erg cm⁻²s⁻¹ en la banda 2-10 keV en 10⁵ s) con posibilidad de obtención de espectros con una gran resolución. *XMM* podrá obtener imágenes X en unas seis horas de integración y detectar objetos diez veces más débiles que en imágenes del observatorio *Einstein* en una semana de exposición.

La situación de la misión, que ha sufrido varios problemas técnicos en su desarrollo, ha mejorado sensiblemente en los últimos tiempos. En primer lugar, se ha podido desarrollar la tecnología necesaria para la fabricación de telescopios anidados de alta resolución y amplio rango de energías mediante la colocación de 58 espejos sobre el mismo eje óptico, realizados por técnicas de electroformación de níquel. En lo que se refiere a los instrumentos aprobados para instalar en el plano focal, se están desarrollando actualmente los ya mencionados EPIC (la cámara de imágenes) el espectrómetro mediante redes de transmisión (RGS).

El lanzamiento de la misión *XMM* está programado para mediados de 1999. Su vida operativa está prevista que supere los diez años y el tiempo de observación se pondrá a disposición de la comunidad científica internacional a través de un sistema de peticiones de tiempo y un comité de selección en base a criterios de calidad científica de las propuestas. Las características de la misión aseguran que *XMM* será una herramienta fundamental para la Astronomía X a comienzos del

siglo XXI. Con ella, Europa espera recuperar el liderazgo mundial en la investigación de altas energías comenzado con la misión, ya antigua, *Exosat* y mantenido sólo gracias a *Rosat*.

Una de las apuestas más fuertes de la ESA para el Programa Horizonte 2000, ha sido la misión *INTEGRAL* (*the International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*), que fue seleccionada en 1993 tras recoger el testigo de *GRASP*. El lanzamiento está previsto para el año 2001. La NASA y la Agencia Espacial Rusa (RKA) contribuyen en menor medida. La primera, proporcionando una estación de seguimiento perteneciente a la Red de Cielo Profundo (DSN) para así poder seguir al satélite de manera más continuada. Y la segunda, proporcionando un potente vector *Protón* que colocará a *INTEGRAL* en una órbita muy alejada de la Tierra, de modo que se minimiza el paso por la AAS.

Aparte de la espectroscopía de alta resolución en el rango de los rayos gamma, el principal objetivo es la imagen de fuentes celestes en el rango 15 keV-10 MeV. Los instrumentos principales son dos: SPI (un espectrómetro constituido por detectores de germanio) e IBIS (un instrumento para producir imágenes, que componen detectores de CdTe y CsI). Ver Figura 147. Complementan la carga útil dos monitores: uno óptico (OMC, *Optical Monitoring Camera*), cuyo principal investigador es el primero de los autores de este libro, y uno de rayos-X (JEM-X, *Joint European X-ray Monitor*).

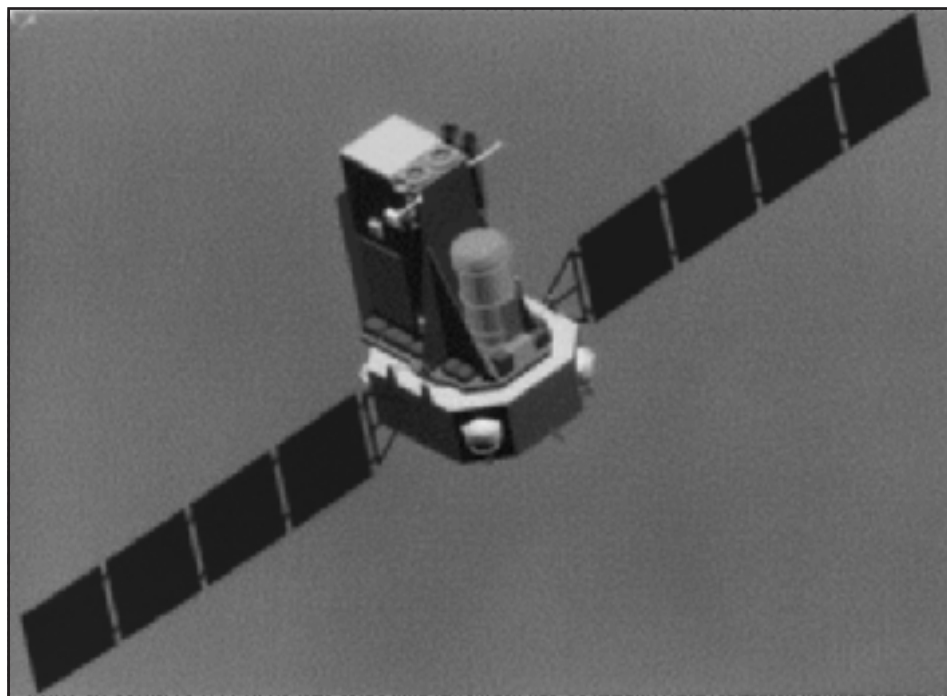


Fig. 147: Concepto de *INTEGRAL* en el espacio. *Jem-X* es el telescopio doble situado entre *IBIS* y *SPI*.

SPI será capaz de realizar análisis espectrales de fuentes en el intervalo 2 keV - 1 MeV, con una resolución sin precedentes de 20 keV a 1 MeV. Los objetivos principales son la espectroscopía fina de ciertas líneas y el estudio de la emisión difusa en escalas del orden de 1° . El punto de partida son 19 prismas hexagonales (detectores de germanio de alta pureza) que se enfrían a 85 K. El área total subtiende 500 cm^2 . Una máscara codificada se sitúa 1,7 m por encima, lo que proporciona un campo de visión -totalmente codificado- de 16° , con 2° de resolución, la cual no es demasiado buena, pero para ello está IBIS.

IBIS adquirirá imágenes en el rango 15 keV-10 MeV, con una resolución de $1'$. Este es, sin duda, el objetivo primordial. Se utilizan dos planos de detectores. Un primer plano (2.600 cm^2) formado por elementos de CdTe, y un segundo (3.100 cm^2) por elementos de CsI. Este doble sistema hace que se pueda seguir la trayectoria de los fotones en tres dimensiones. Todo el conjunto está protegido por un sistema de veto formado por centelladores de BGO.

JEM-X (ver figura 148) proporcionará imágenes con una resolución angular de $3'$ en la banda de energía 2-60 keV. Objetivos son la identificación de fuentes de alta energía y su estudio en rayos X. El sistema consiste de dos instrumentos idénticos. Cada uno de ellos está constituido por:

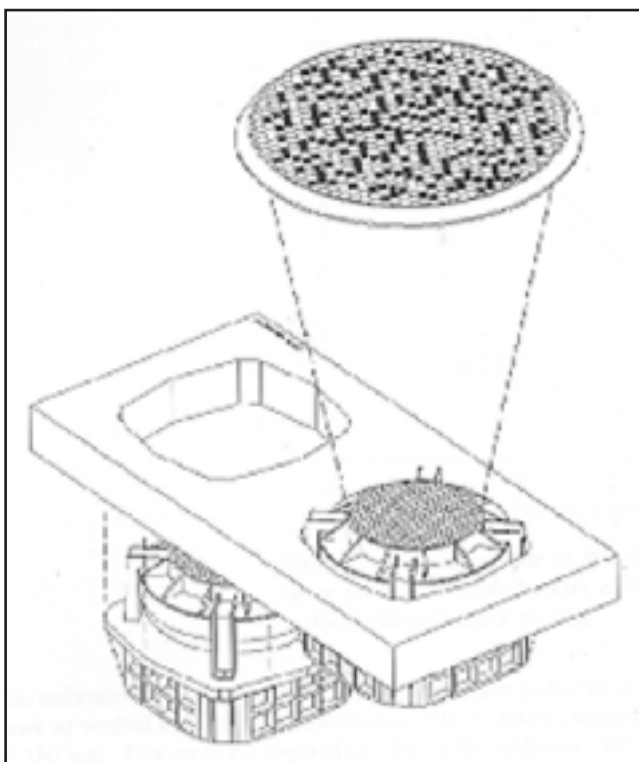


Fig. 148: JEM-X, con la máscara codificada en la parte superior de la imagen, y el detector MSPC y colimador en la parte inferior. En España, el diseño definitivo de la máscara ha sido responsabilidad de la Universidad de Valencia, mientras que el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial es el encargado de realizar los diversos ensayos.

-un detector tipo MSPC con gas xenón a 5 bares de presión, con 500 cm² de area, parecido a HEPC en *Spectrum X/Γ*.

-un colimador, realizado en molibdeno que, aparte de definir el campo de visión, proporciona el soporte para el asiento de la ventana de 250 μm.

-una máscara codificada (de tungsteno, con un grosor de 0,5 mm) a 3,2 m del detector. El campo de visión -totalmente codificado- es de 4,8°.

La ESA ha apostado fuerte por esta misión. Los resultados serán, sin duda, muy fructíferos.

6.10. Más allá del 2005.

La continuación del programa japonés ASTRO, prevé la misión *Astro-F*, que no estará dedicada a Astronomía X, sino al infrarrojo. Es por lo que para poder seguir la estela de Astro-E, varias instituciones japonesas propusieron cinco experimentos, de los cuales sólo uno será instalado en el Módulo Experimental Japonés (JEM) de la *Estación Espacial Internacional*. El elegido ha sido un monitor de rayos X de todo el cielo (MAXI). Aún así, la comunidad científica japonesa ya está planeando la siguiente misión para ser lanzada con un vector M-V hacia el año 2006. La idea conceptual es que se trate de un «super espejo», que, combinado con un detector de semiconductor (como CdZnTe), tendría un área efectiva de 500 cm² en el rango 10-50 keV, donde detectaría fuentes muy débiles, con intensidades de 10⁻⁵ - 10⁻⁶ veces la de la Nebulosa del Cangrejo. Además, combinado con cámaras CCD, podría obtener espectroscopía de muy alta resolución en el rango 0,5-10 keV, con un área efectiva de 1 m².

En Estados Unidos, y como posibles sucesores de *AXAF*, se han aceptado tres misiones X para fase de estudio tras la respuesta a un anuncio de oportunidad en 1994. Éstas han sido *HTXS*, *EXIST* y *HXTM*. Dado que sólo una de ellas va a ser aprobada, se han iniciado estudios conjuntos, en particular entre *HTXS* y *HXTM* a fin de llegar a una misión. En cualquier caso, hablaremos brevemente de cada una de las tres.

HTXS (*High Throughput X-ray Spectroscopy*), llamado a partir de ahora *CONSTELACION* combina un área efectiva de 1,5 m² a 1 keV (y de 0,15 m² a 40 keV) con alta resolución espectral, cubriendo un rango de 0,25 a 40 keV (incluso podría llegar a 100 keV). En la propuesta original no era un único satélite lo que se proponía, sino seis, de tamaño modesto a fin de obtener el área deseada. Ello se hacía con idea de reducir costos, de acuerdo con las exigencias de planificación actuales de la NASA debido a los recortes presupuestarios. Un satélite se iría lanzando cada 3 ó 4 meses, por medio de un lanzador *Delta*, de modo que en unos 20 meses ya estaría toda la flota en el espacio. Cada satélite llevaría dos telescopios coalineados, con espejos de 1,3 y 0,7 m de diámetro. Una vez en órbita, ya desplegados (figuras 149 y 150), equivaldría a sendos telescopios de 8 y 12 m una distancia focal. El primero, se dedicaría a espectroscopía en la banda 0,25-10 keV,

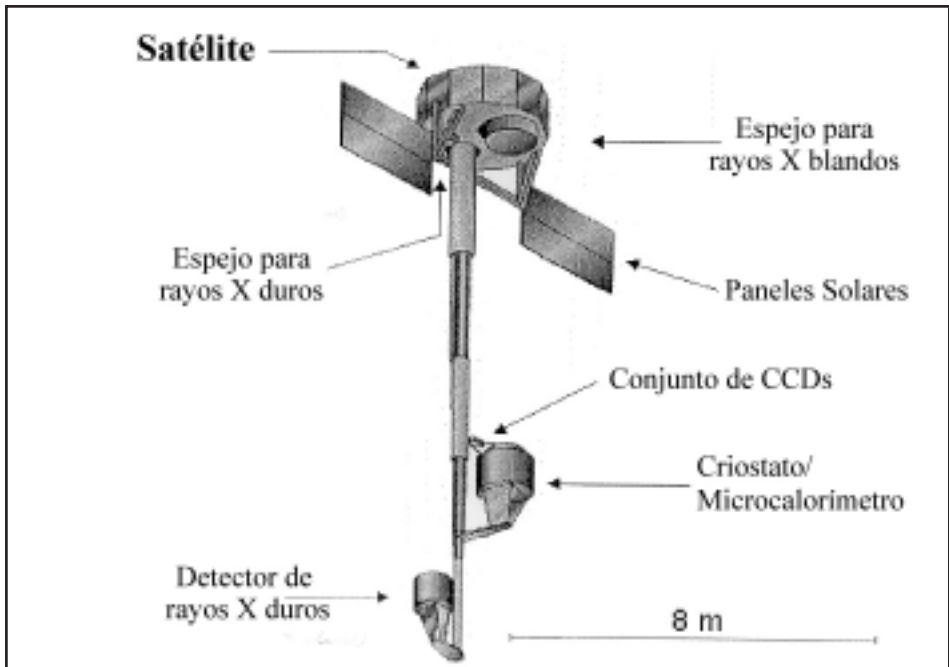


Fig. 149: El concepto inicial de uno de los seis satélites de la misión HTXS. De Nick White, Harvey Tananbaum y colaboradores, en *The Next Generation of X-ray Observatories*, Turner, M. y Watson, M. (eds.), Leicester X-ray Astronomy Group Special Report XRA97/02 (1997).

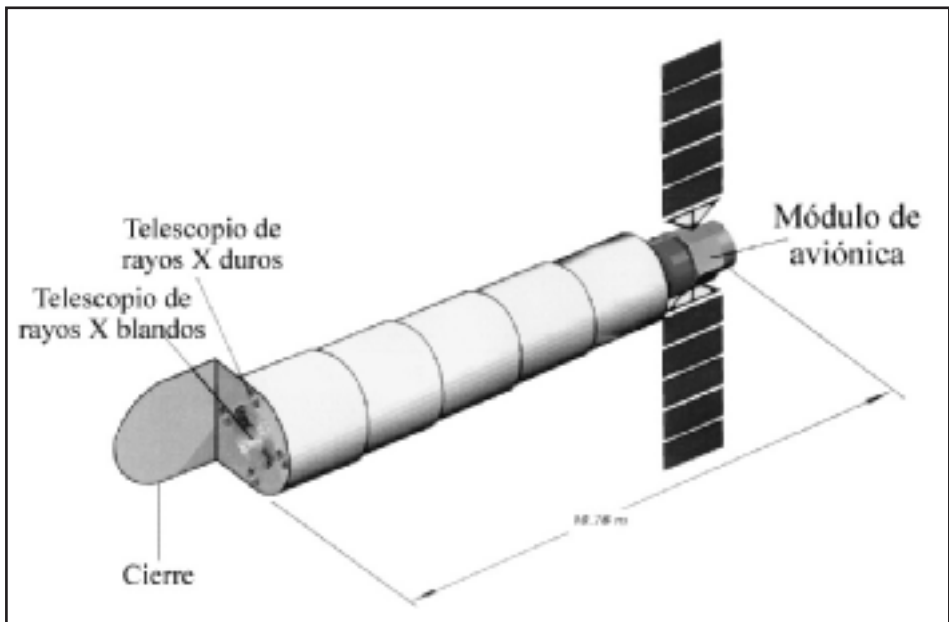


Fig. 150: Configuración actual de HTXS (CONTELACION).

y el segundo a espectroscopía en la región 10-40 keV. La resolución en el primer caso debería de ser de 2 eV (a 6 keV) para resolver todas las líneas del hierro en esa banda y poder hacer diagnósticos muy detallados del plasma. En el segundo, sería suficiente alcanzar 1 keV de resolución. Los campos de visión serían de 2' y 10' respectivamente, con resolución espacial de 30'' y 2', lo que constituye un punto flojo de esta misión, y es que por el momento parece imposible conseguir alta resolución espectral y espacial al mismo tiempo.

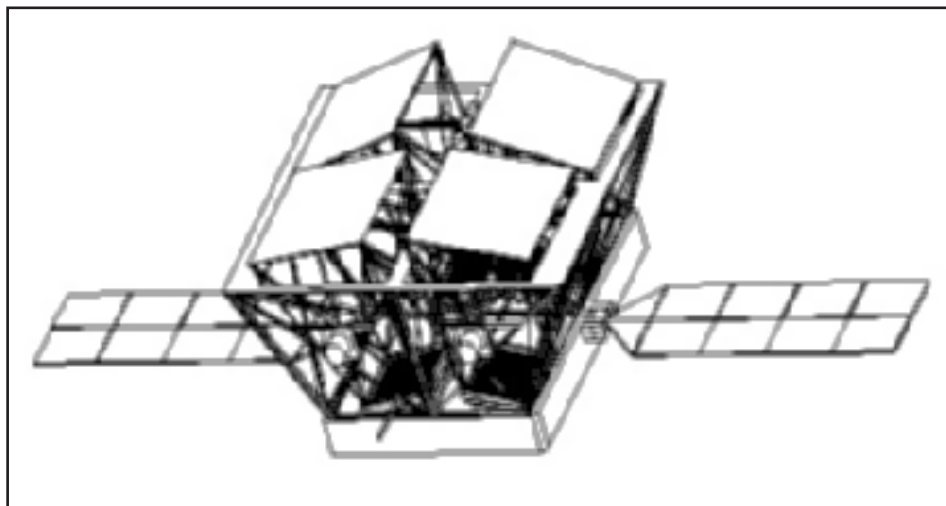


Fig. 151: Una posible configuración de EXIST, en la que los 4 módulos están dispuestos con orientaciones ligeramente diferentes, de modo que la determinación de la posición de las fuentes de rayos X sea más precisa, como se haría durante la primera fase de monitoreo de la esfera celeste. En la fase siguiente, los cuatro módulos se alinearían de modo que se consiguiera la máxima sensibilidad en una observación profunda. De Josh Grindlay, Tom Prince y colaboradores, en *The Next Generation of X-ray Observatories*, Turner, M. y Watson, M. (eds.), Leicester X-ray Astronomy Group Special Report XRA97/02 (1997).

EXIST (*Energetic X-ray Imaging Survey Telescope*) es una misión ideada para hacer un monitoreo del cielo en la banda 5-600 keV, cubriendo pues parte de la banda gamma. Incluiría cuatro telescopios de gran campo, con abertura de máscara codificada y detectores de estado sólido de CdZnTe, dispuestos a modo de píxeles a fin de proporcionar una buena resolución espacial. El área de cada uno de los cuatro módulos es de 0,25 m². Una posible configuración se muestra en la figura 151.

HXTM (*Hard X-ray Telescope Mission*) consistiría en un sistema de telescopios para observar desde el dominio UV hasta los rayos gamma suaves (1 MeV), con gran sensibilidad y muy buena resolución angular en el rango 10-100 keV. Tres experimentos lo conforman. El instrumento principal sería el MMT (*Modular Multilayer Telescope*) y lo componen 15 telescopios de incidencia rasante en los que se emplean multicapas de modo que se pueden reflejar fotones con energías mayores de los que pueden reflejar el oro o iridio, con los que normalmente se solían recubrir las láminas reflectantes en misiones anteriores. Como detectores,

se emplearían CCDs conjuntamente con un mosaico de germanio o de CdZnTe. Se espera que la resolución sea de unos 6". Los otros instrumentos serían el monitor UV y LCT (*Laue Crystal Telescope*), para el rango 100 keV-1,2 MeV. Sin embargo, éstos dos últimos no van a tener continuidad dentro de los planes de refundición de las misiones que actualmente se están llevando a cabo con *HTXS*.

Por su parte, algunos grupos europeos están trabajando en *Xeus*, una misión posterior a *XMM* cuyo instrumento principal es un telescopio ultraligero de gran tamaño (10 m² de área). El rango de energía es de 0,1-7 keV y la resolución espectral será de 10.000. Será ensamblado en órbita hacia el año 2010, al abrigo de la *Estación Espacial Internacional* (figura 152).

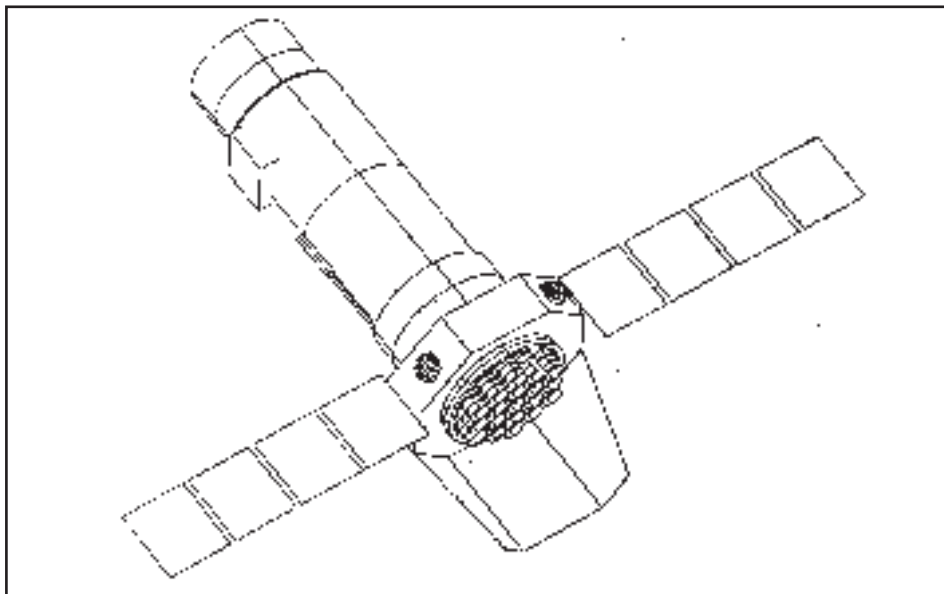


Fig. 152: Un concepto muy preliminar de Xeus. De M. Turner y colaboradores, en *The Next Generation of X-ray Observatories*, Turner, M. y Watson, M. (eds.), *Leicester X-ray Astronomy Group Special Report XRA97/02* (1997).

6.11. ¿Y después?

En el caso de las CCDs, en el futuro ya se vislumbra un tercer tipo: los detectores de tipo DPAD (*DEPFET Pixels Array Detectors*, significando la primera palabra *DEpleted P-channel Field Effect Transistor*), para los que la resolución en la posición es mejor que 5 micras, y su eficiencia cuántica alcanza 50 % a 20 keV, superior a las de tipo pn (figura 153). En ambos tipos, los rayos X inciden en la parte trasera del detector originando los pares electrón-hueco ya reseñados. Se están reduciendo los ruidos de lecturas y obteniendo mayores velocidades de lectura. Es muy posible que en un futuro próximo se puedan hacer estudios de polarización de los rayos X con estos tipos de CCDs.

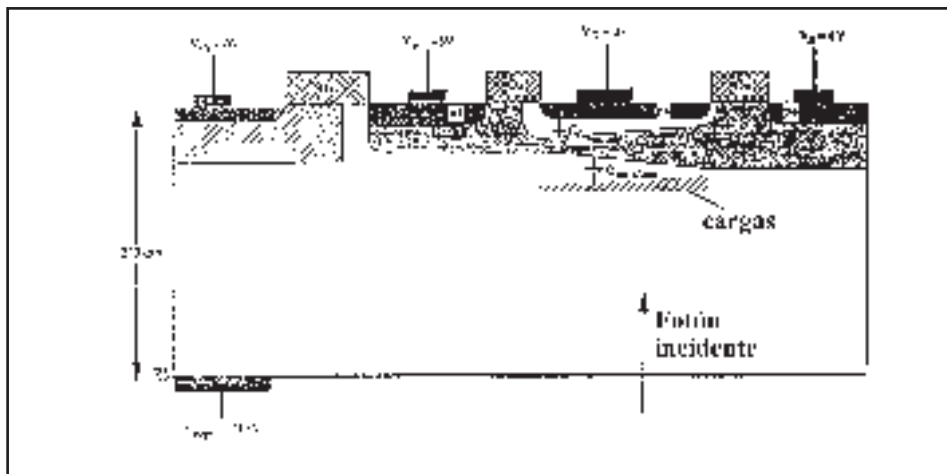


Fig. 153: Una CCD de tipo DPAD. De Lothar Strüder y Joachin Trümper, en *The Next Generation of X-ray Observatories*, Turner, M. y Watson, M. (eds.), Leicester X-ray Astronomy Group Special Report XRA97/02 (1997).

Importantes perspectivas se ofrecen con el uso de *multicapas*. Una multicapa es, básicamente, un conjunto de capas alternadas de dos materiales, uno de alta densidad y otro de baja, como platino y carbono (figura 154). El diseño varía según la longitud de onda y el ángulo de incidencia de la radiación observada. Uno de los problemas viene dado por la deposición de multicapas sobre un sustrato de oro, imprescindible en las técnicas de réplica, y éste último puede afectar la reflexión para fotones con energías mayores, debido a la microrrugosidad de la propia de-

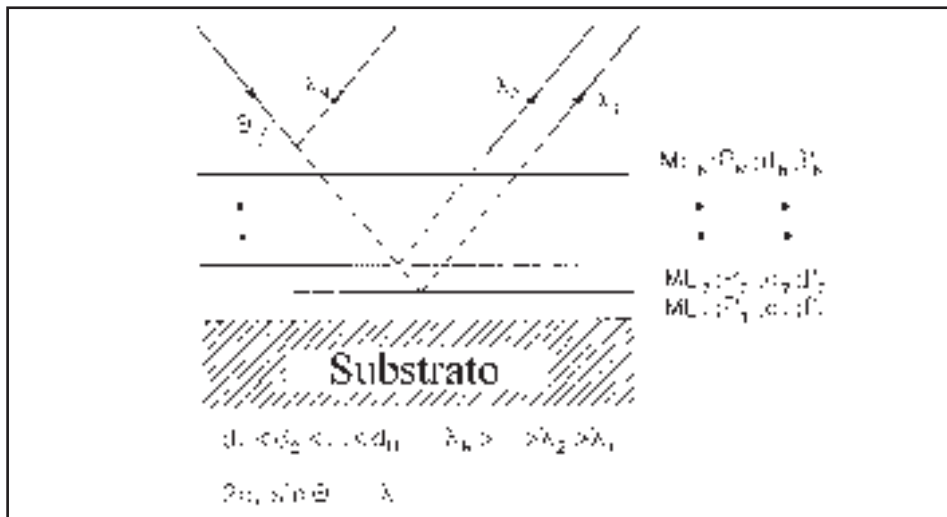


Fig. 154: Concepto de una multicapa. La primera multicapa se deposita en el sustrato (ML_1) y tiene P_1 periodos en el que se alternan un material de alta densidad y otro de baja. d_i es el periodo y Γ_i es el cociente entre el grosor y d_i . El proceso de deposición del material continúa hasta que hay N multicapas diferentes con $d_1 < d_2 < \dots < d_N$. De este modo, los fotones de más alta energía se reflejan en las capas inferiores y los menos energéticos en las más altas. Cortesía de Finn E. Christensen et al. (1994)

posición. Un problema adicional también se presenta por las microtensiones que aparecen en las superficies pre-curvadas al efectuar la deposición. El empleo de multicapas en combinación con espejos delgados va a permitir reflejar fotones X hasta los 100 keV, con el consecuente impacto para la obtención de imágenes y espectros de gran calidad en todo el rango X. Una de las tareas a efectuar es aumentar el área de cada espejo, lo que prácticamente conlleva el uso de focales mayores de 8 m, pero la ganancia no compensaría. La ventaja fundamental, no obstante, es la extensión de las observaciones hasta 100 keV, para los que ya se están ideando «super espejos de multicapas».

Por lo que se refiere a la resolución espectral, ya hemos visto que en algunas misiones se van a emplear microcalorímetros, que van a permitir llegar a resoluciones de 7 eV. Se basan en la detección de fotones X (uno a uno) que, al ser absorbidos en un medio de baja capacidad calorífica, producirán un incremento de temperatura que nos va a indicar la energía del fotón absorbido (figura 155). Básicamente, constan de dos componentes: el elemento que mide la temperatura (un termistor) y el absorbente del fotón X (un material como HgTe). Aunque en teoría, la resolución podría llegar a 1 eV e incluso menos, para microcalorímetros operando a 0,1 K, hay una serie de factores que hacen que esto no sea así. De hecho, se está estudiando el empleo de termómetros de superconductores, que podrán aumentar la resolución espectral en un factor 10. También se han propuestos bolómetros de electrones calientes en los que se emplea un metal como absorbente y una unión SIN (superconductor-aislante-superconductor) como termómetro. El límite de resolución sería de unos 0,5 eV.

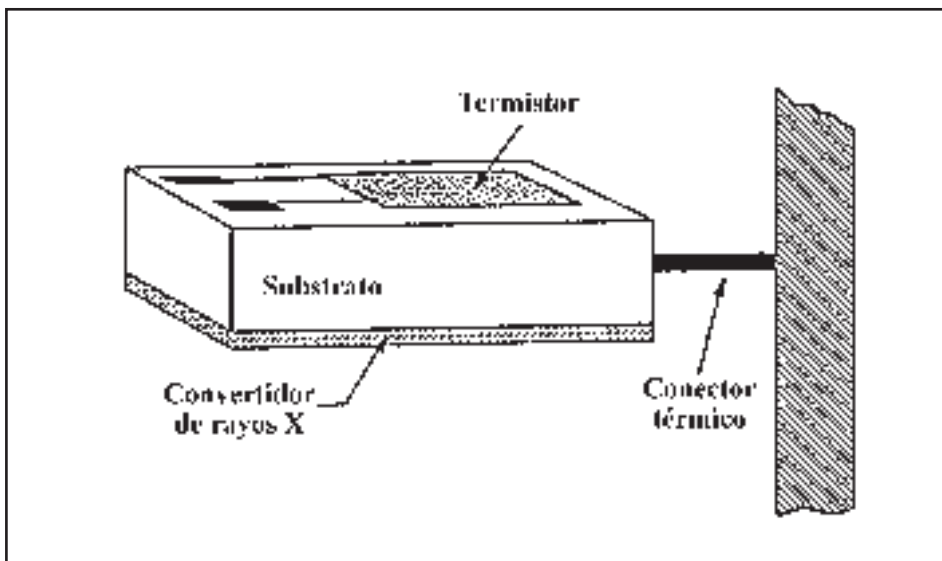


Fig. 155: Esquema de un calorímetro para la detección de los rayos X (ver texto).

Por lo que respecta a imágenes, sabemos que la calidad final de la imagen depende de la perfección en el pulido de los elementos que constituyen el concentrador tipo Wolter. Al ser las superficies no esféricas, es un proceso muy laborioso y complicado, y el resultado final siempre dista bastante de la superficie teórica. El americano Webster Cash, sin embargo, ha ideado un método por el cual, en vez de las dos clásicas reflexiones que se dan en un telescopio Wolter I, serían necesarias cuatro reflexiones sobre cuatro esferas en serie (figura 156), pudiéndose llegar hasta $0'',1$, algo sin precedentes en la Astronomía X. El método nos recuerda parcialmente al sistema ideado por Kirkpatrick y Baez en los años 40 (fig. 34). La NASA ya ha anunciado un plan para lanzar un experimento a bordo de un cohete de sondeo. Y lo que es más, el siguiente paso será sin duda, la realización de interferometría (figuras 159 y 160). Siguiendo el modelo de interferómetro ideado por Michelson a principio de siglo, se podría hacer uso de la interferometría X. Solamente se necesitan dos haces de fotones X que se mezclan en el plano focal. Nada más. Los resultados serían realmente impresionantes. Mientras que en el óptico alcanzar una resolución de $0'',001$ requiere una línea de base de 100 m, en el caso de los rayos X sería sólo de 10 cm. Para $0'',000001$, sólo 100 m. Es entonces cuando realmente podríamos ver las coronas de otras estrellas, el horizonte de sucesos de los agujeros negros,...y así seguir soñando con descubrir los pequeños secretos que este Universo nuestro aún celosamente nos guarda.

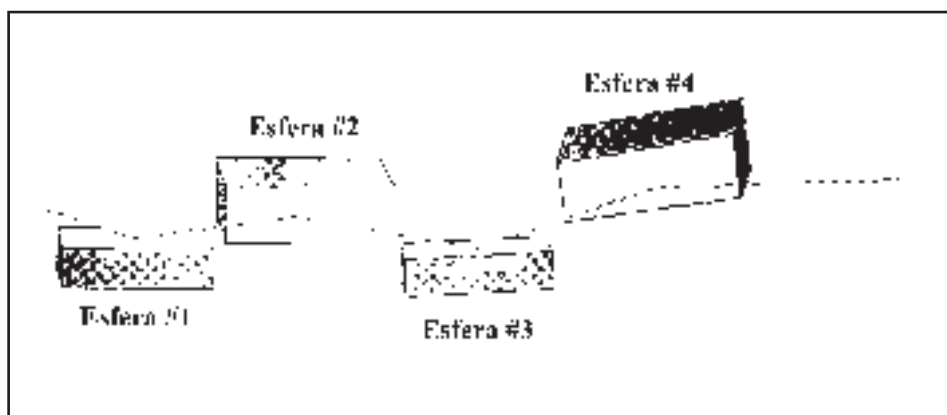


Fig. 156: Cuatro superficies esféricas en serie pueden proporcionar una excelente calidad de imagen. De Webster Cash, en *The Next Generation of X-ray Observatories*, Turner, M. y Watson, M. (eds.), *Leicester X-ray Astronomy Group Special Report XRA97/02* (1997).



Fig. 157: Las misiones que, aparte del MINISAT-01 ya en órbita, van a ser lanzadas a partir de 1998, ordenadas según la fecha de lanzamiento prevista. Adaptada de J. S. Allen (NASA/GSFC).

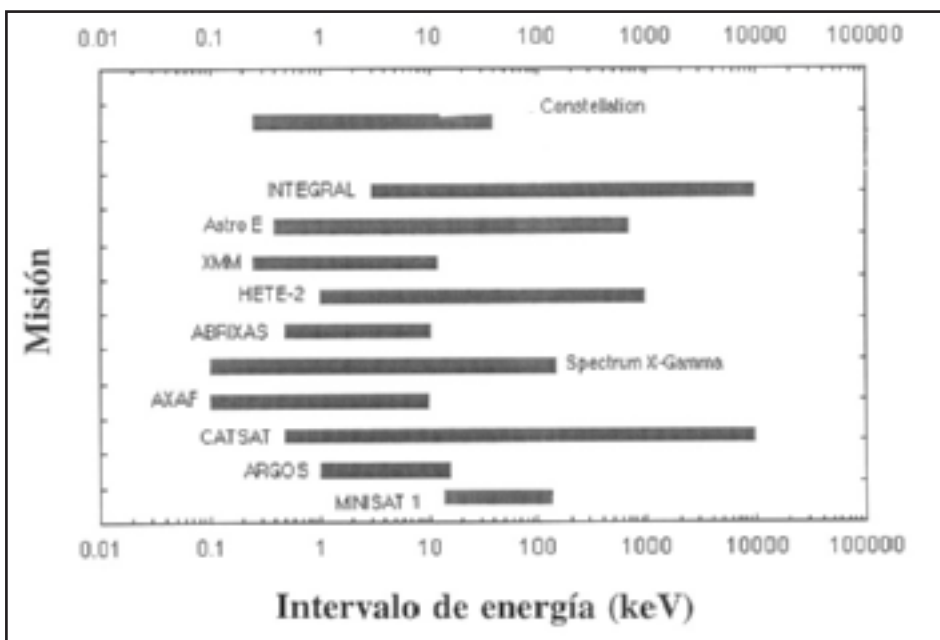


Fig. 158: Las misiones que se muestran en la figura anterior, pero esta vez ordenadas según los diversos rangos de energía que comprenden. Adaptada de J. S. Allen (NASA/GSFC).

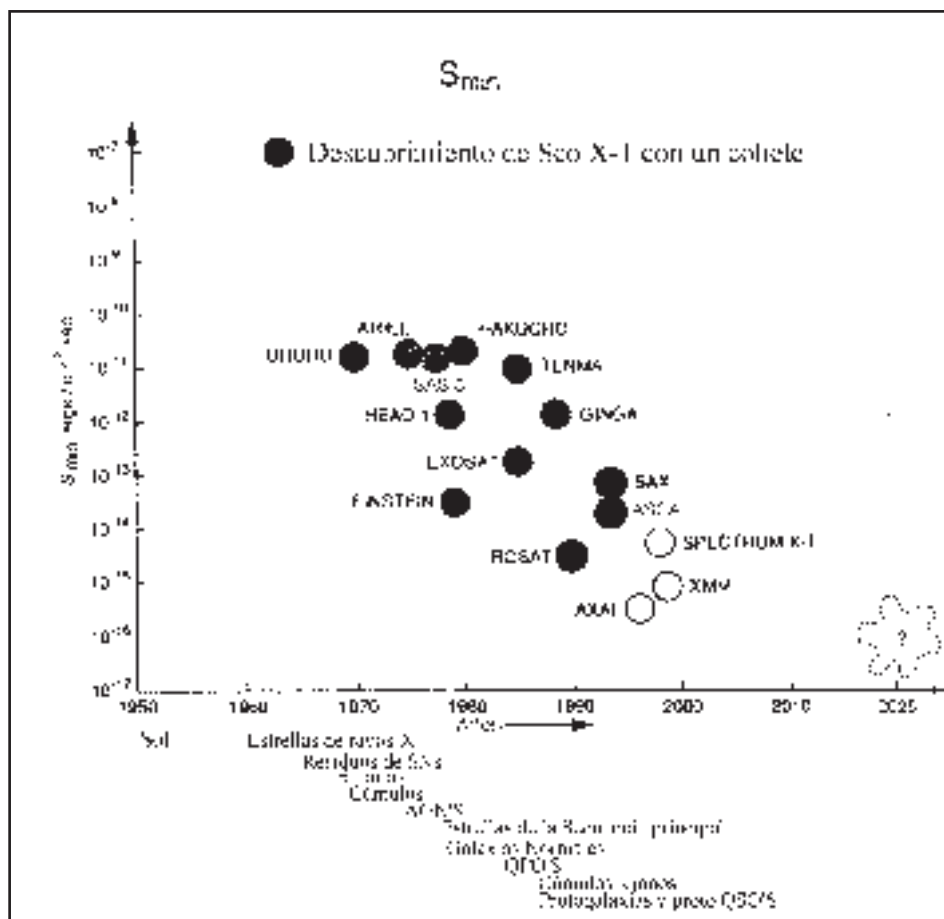
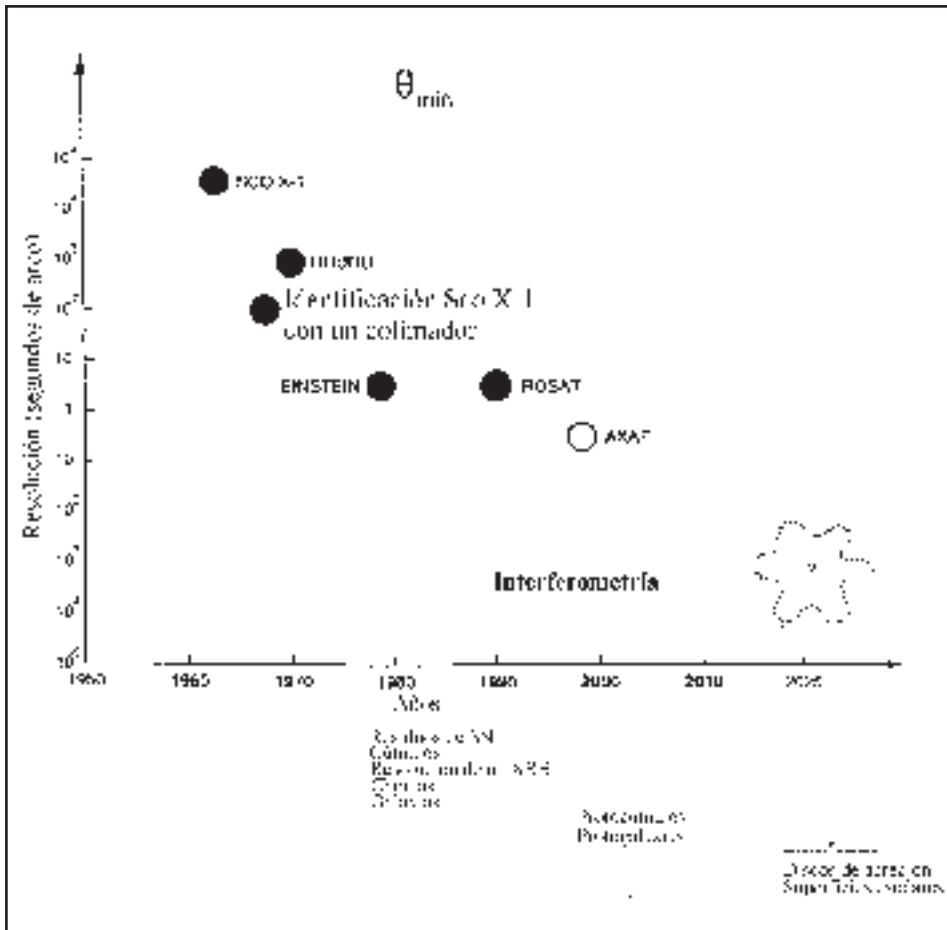


Fig. 159: Una representación esquemática de las misiones X (pasadas, presentes y futuras) con respecto al límite de detección S ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$). Adaptado de R. Giacconi, en *Physics of neutron stars and black holes*, Universal Academy Press, Inc., pág. 547 (1988).

CUADRO XXI. EL DETECTOR IDEAL DE RAYOS X.

Según palabras del americano G. W. Fraser, autor del libro «*X-ray detectors in Astronomy*»: «El detector ideal tendría que combinar una muy buena resolución espacial conjuntamente con una gran área colectora, una alta resolución temporal, con capacidad de operar con flujos X muy altos, así como una buena resolución espectral y eficiencia cuántica sobre un amplio rango de energías. La respuesta del detector debería de ser estable durante varios años,



y el fondo instrumental de radiación, mínimo. Además debería ser inmune a la degradación a la que otros instrumentos, en sus órbitas, son sometidos por efecto de partículas y que tampoco llevara componentes que se perdieran a lo largo de la misión. En general, sería simple, ligero, rígido y de bajo coste, con un bajo consumo. No tendría partes móviles y proporcionaría una mínima cantidad de datos.» (A lo que añadimos nosotros: «¡preferiblemente ya reducidos y calibrados!).

Pero como él mismo continúa diciendo: «Tal detector no existe». (¡Por desgracia!).

APÉNDICE

APÉNDICE: Mecanismos físicos para generar rayos X

Como ya hemos dicho en varias ocasiones, la Astronomía de rayos X estudia principalmente plasmas astrofísicos con temperaturas en el rango entre 250 mil y 300 millones de grados. Estos plasmas radian la mayor parte de su energía en longitudes de onda de rayos X, entre 0,25 y 100 Å. En el capítulo I, ya hicimos referencia a la emisión de un cuerpo negro para asociar el rango de energías con la temperatura de los objetos emisores. El cuerpo negro es un concepto utilizado por los físicos para calcular las características de la radiación electromagnética correspondiente a un objeto que se encuentre a una determinada temperatura. En efecto, la radiación de un cuerpo negro es aquella que emite un objeto que puede absorber toda la radiación que recibe y, por tanto, corresponde a la emisividad propia, no a la luz reflejada. Aunque esto es una condición ideal, difícil de encontrar en la naturaleza, en el laboratorio se obtiene una buena aproximación mediante la introducción de un rayo de luz a través de un pequeño agujero en un tubo cerámico calentado. Fuera del laboratorio, las estrellas representan una buena aproximación a un cuerpo negro y los astrofísicos deducen muchas de sus propiedades de la comparación entre la radiación observada y los valores predichos según las leyes físicas del cuerpo negro.

En cierto modo, se puede identificar la radiación de cuerpo negro con la radiación «perfecta» de un objeto y las leyes que describen esta radiación se basan en la teoría del equilibrio termodinámico. En la figura 5, presentábamos la forma del espectro de radiación continua procedente de diferentes cuerpos negros en función de la temperatura correspondiente a la fórmula.

$$F(E, T) = \frac{2E^3}{h^2 c^2 (e^{\frac{E}{kT}} - 1)}$$

donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz y k la constante de Stefan-Boltzmann. Es fácil ver que el máximo de emisión de un cuerpo en el rango de los

rayos X se obtiene para temperaturas del orden del millón de grados o superiores (figura 161). Desde los 2.500 K de enana roja, pasando por los 6.000 K del Sol y hasta los 40.000 K de una estrella de tipo O, el máximo de emisión se produce en el rango óptico. El hecho de que podamos ver radiación X, refleja por tanto la existencia de objetos a muy alta temperatura en el Universo (varios millones de grados), ya que la contribución al rango X de la distribución de energía de los objetos de temperatura moderada como el Sol es prácticamente despreciable. Aunque sabemos que no existen estrellas normales con temperaturas superficiales tan altas, ésta sí que se puede dar en la superficie de estrellas de neutrones jóvenes.

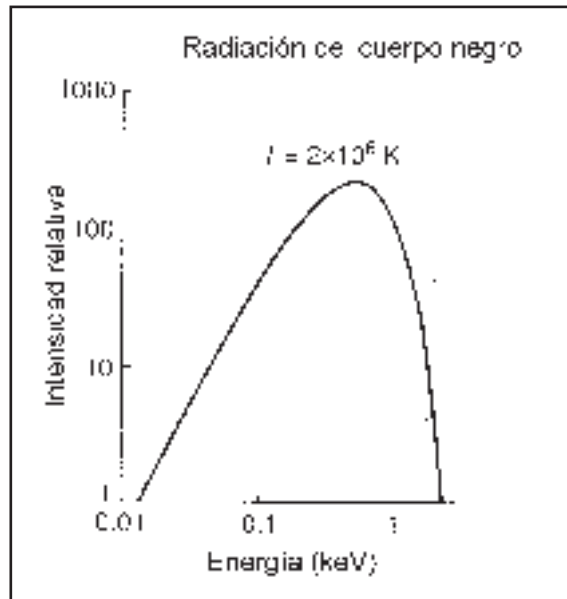


Fig. 161: Radiación de cuerpo negro producida por un objeto a una temperatura de 2 millones de grados, como puede ser la superficie de una joven estrella de neutrones.

Otra manera de encontrar regiones de alta temperatura en el Universo es que se produzcan partículas a muy alta velocidad, por ejemplo en campos magnéticos intensos, o grandes presiones (ondas de choque), como puede ocurrir en la expansión de materia a través del medio interestelar después de una explosión supernova. También podríamos pensar que si se pueden liberar grandes cantidades de energía gravitacional, como ocurre en la caída de materia sobre los polos de una estrella de neutrones en un sistema binario, es posible que esta energía se transforme en radiación dentro del rango adecuado.

Los plasmas son muy abundantes en el Universo. Un plasma es un gas ionizado y caliente, compuesto de electrones e iones, en el que pueden ocurrir multitud de interacciones capaces de producir rayos X, la mayor parte basadas en el hecho físico de que una aceleración o cambio de velocidad sufrida por una partícula cargada eléctricamente produce radiación electromagnética. Pero veamos con algo más de detalle cuáles son los procesos físicos que pueden producir fotones en el rango

de longitudes de onda que hemos clasificado como rayos X. Además de la mera radiación térmica, cuyas propiedades podemos calcular con las leyes del cuerpo negro ya mencionadas, hay una serie de mecanismos físicos de origen no térmico que también pueden producir radiación X (figura 162). Estos son:

- Radiación sincrotrón
- Difusión Compton
- Radiación de frenado
- Recombinación radiativa
- Pares electrón-positrón

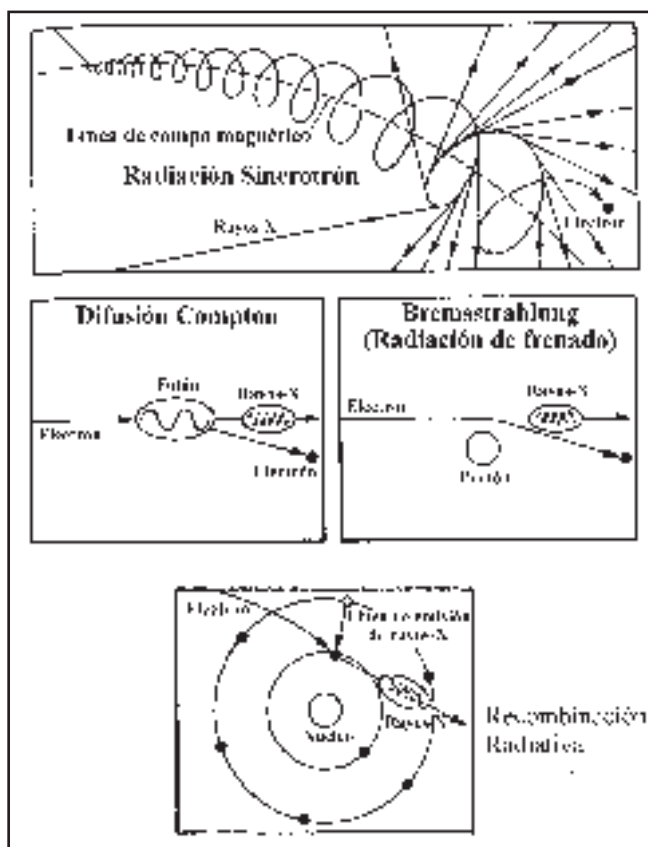


Fig. 162: Representación esquemática de los diferentes procesos físicos que conllevan la producción de rayos X: radiación sincrotrón, difusión Compton, radiación de frenado y recombinación radiativa.

En aquellos casos en los que el espectro se puede medir en un amplio rango de energías con una buena resolución espectral, es posible deducir las condiciones físicas de la región emisora y los mecanismos físicos responsables de la propia emisión. Veamos ahora en detalle cada uno de ellos.

Radiación sincrotrón.

Este tipo de radiación se produce cuando una partícula cargada (como un electrón) se mueve a velocidades relativistas en campos magnéticos intensos. La partícula experimenta una aceleración correspondiente al cambio en la dirección del vector velocidad de la misma al girar alrededor de las líneas de fuerza del campo, radiando fotones de alta energía (la llamada **radiación sincrotrón**), que puede incluir el rango X cuando los campos magnéticos son suficientemente intensos. El espectro adquiere la forma de una ley de potencias (ver cuadro XVI)

$$F(E) = A E^{-\alpha}$$

donde A es una constante y α el índice espectral (figura 163). Un menor valor de α implica un espectro más duro (más energético).

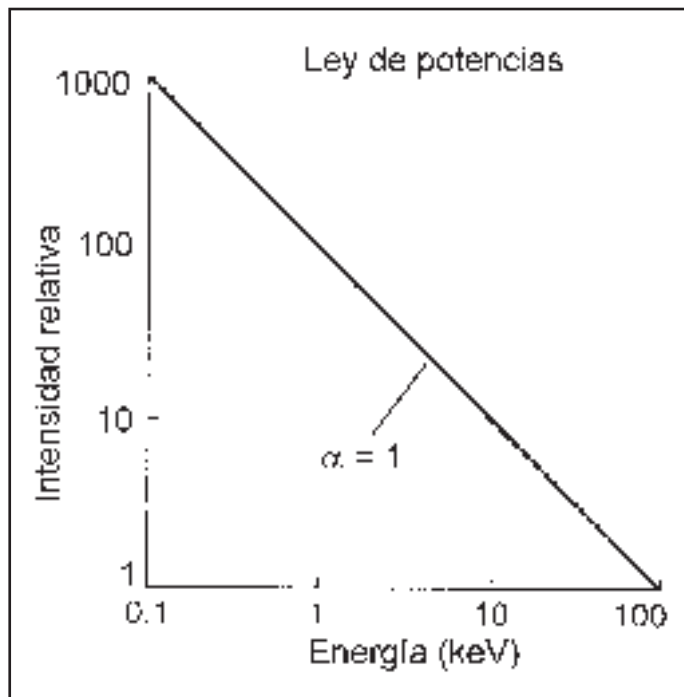


Fig. 163: Radiación sincrotrón de electrones relativistas. El espectro adquiere la forma de una ley de potencias con índice espectral α .

Este tipo de emisión es el que puede ocurrir en los campos magnéticos de las estrellas de neutrones, enanas blancas, etc. La radiación sincrotrón normalmente implica polarización elíptica, de ahí que los estudios de polarización de los rayos X sean importantes. El correspondiente proceso de absorción es llamado **absorción sincrotrón** (*synchrotron self-absorption* en inglés).

Difusión Compton.

Ocurre cuando un fotón de alta energía interacciona con una partícula estacionaria (o que se desplace lentamente), de modo que el primero transfiere parte de su energía y momento, finalizando pues, con una energía y momento inferiores a los valores iniciales. Este proceso es la llamada **difusión Compton**, que toma el nombre de *difusión Thompson* si fotones con energías en el rango de los rayos X clásicos y blandos están involucrados. El proceso inverso, por el cual una partícula altamente energética transfiere energía y momento a un fotón de baja energía recibe el nombre de *difusión Compton inversa* (o simplemente **efecto Compton inverso**), pudiendo producir radiación X en un rango muy amplio. En el capítulo III ya mencionamos el efecto Compton para explicar el funcionamiento de los sistemas contadores de fotones X mediante la producción de un centelleo en redes cristalinas de yoduro de sodio.

Radiación de frenado.

En el caso de un plasma suficientemente poco denso como para ser considerado «delgado» y transparente a su propia radiación, es usual que las partículas se encuentren en equilibrio térmico, queriendo esto decir que la energía promedio de todas las partículas - determinada básicamente por la temperatura T - viene a ser la misma. Pues bien, el mecanismo de emisión, llamado **radiación de frenado** (o «*Bremsstrahlung*» por la palabra en alemán del mismo significado), ocurre cuando una partícula cargada en movimiento (por ejemplo un electrón libre del propio plasma) pasa cerca de un ión pesado, de modo que curvará su trayectoria por la atracción de los protones del núcleo cargados positivamente, sufriendo asimismo una deceleración. La deceleración producida se corresponde con la emisión de energía en la forma de un fotón cuya longitud de onda depende de la interacción, en particular, de la diferencia de energías del electrón deflectado entre los dos estados libres, $E = W_i - W_f$. De hecho, este mecanismo se puede considerar como una transición libre-libre ya que el electrón comienza y termina la interacción sin encontrarse ligado a ningún ión. En este caso aquí descrito (electrones en equilibrio térmico con distribución Maxwelliana de velocidades), el espectro de la radiación producida es un continuo cuya forma depende solamente de la temperatura, y recibe el nombre de *bremsstrahlung térmico*, siendo

$$F(E, T) = AG(E, T)Z^2 n_e n_i (kT)^{-3/2} e^{-E/kT}$$

donde A es constante, donde G es el llamado factor de Gaunt, Z es la carga de los iones positivos, n_e la densidad de los electrones y n_i la densidad de iones (Figura 164). El correspondiente proceso de absorción se denomina **absorción libre-libre**, pero no es de importancia en comparación con otros mecanismos de absorción de rayos-X.

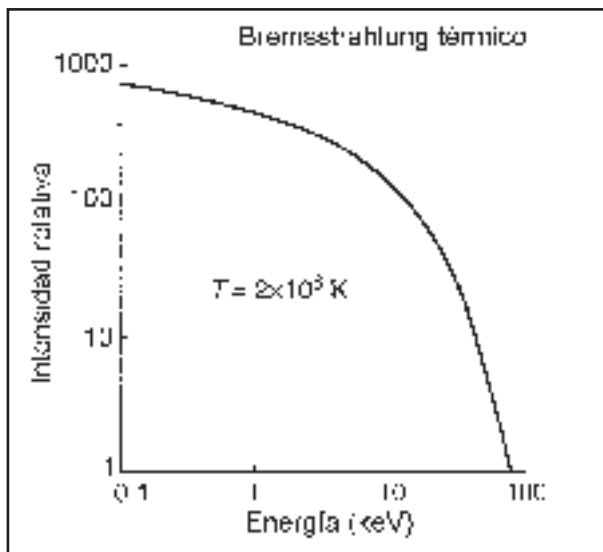


Fig. 164: Espectro de la radiación de frenado emitido por un plasma a 200 millones de grados.

Recombinación radiativa.

Se produce de igual manera que en la radiación de frenado, pero en este caso, el electrón libre que se acerca al ión pesado, puede ser capturado por éste y entrar a formar parte de los electrones alrededor del mismo. Sufre pues, una transición hasta un estado ligado (de energía de ligadura $-E_l$), en vez de a un estado libre. Este proceso -que se puede considerar como una transición libre-ligado- se llama **recombinación** y también libera energía en forma de un fotón, cuya energía dependerá de la diferencia entre la que tenía el electrón libre y la que puede tener en la capa de electrones en que se instala dentro del átomo que le captura. El fotón emitido tiene una energía $E = W_i + E_l$.

El proceso inverso se conoce como **absorción fotoeléctrica**, y es de especial importancia en el caso de fotones de baja energía, del orden de $h\nu \ll m_e c^2$. Si la energía que tiene el fotón que va a ser absorbido en un determinado nivel electrónico es igual que la energía de ligadura de dicho nivel ($E_l = h\nu$), da lugar a las denominadas *bandas de absorción* características de cada elemento, y estas energías reciben el nombre de *umbrales de absorción* (figura 165). Al ser absorbido el fotón y emitirse el fotoelectrón correspondiente, el átomo queda excitado y van a tener lugar dos mecanismos competitivos entre sí:

i) emisión de un *fotón de fluorescencia*, cuando un electrón de algún nivel electrónico más exterior al nivel de donde se ha emitido el fotoelectrón ocupa la vacante dejada por el fotón emitido. Esta transición violaría el principio de conservación de la energía, a no ser porque se emite un fotón cuya energía es la diferencia entre las energías de los dos niveles electrónicos, que se denomina fotón de fluorescencia. Así, si la vacante dejada por un electrón del nivel K es ocupada por un electrón del nivel L, el fotón tendrá una energía $E = E_K - E_L$.

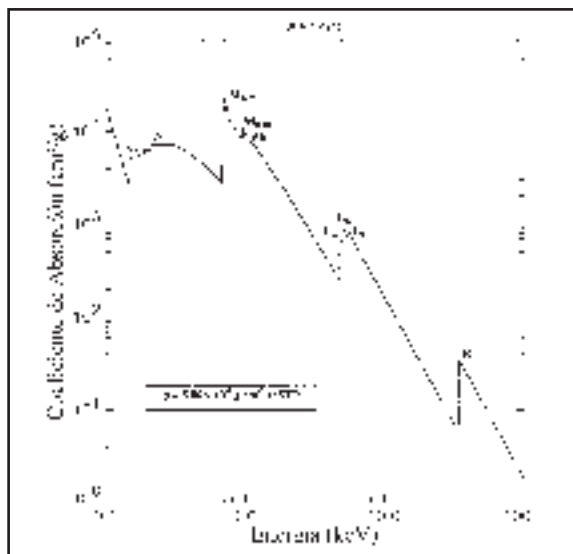


Fig. 165: El coeficiente de absorción másico fotoeléctrico frente a la energía de los fotones, para el Xe. Este coeficiente (en unidades de $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) define la atenuación que experimenta un haz de rayos X de sección unidad por unidad de masa atravesada. Los umbrales de absorción se denotan como X_n , donde X es el nivel electrónico (L, M, N, ...) y n el subnivel (I, II, III, ...). De J. W. Robinson, Handbook of Spectroscopy, col. I, CRC Press (1974)

ii) emisión de un *electrón Auger*, por el cual el átomo regresa a su configuración electrónica inicial mediante la emisión de un electrón de un nivel electrónico más externo. Los átomos con número atómico menor a 31 (Ga) tienen más probabilidad de emitir electrones Auger que radiación de fluorescencia.

Tanto los procesos de interacción libre-libre como libre-ligado pueden liberar energías muy diversas y el efecto observacional sigue siendo un continuo de radiación, es decir, una mezcla de fotones con un rango muy amplio de energías diferentes. Para una temperatura dada, T , la radiación de frenado domina en el caso de longitudes de onda $\lambda (\text{\AA}) \geq 3 \times 10^{-5} / T$.

Pares electrón-positrón.

Bajo determinadas condiciones, **pares electrón-positrón** se crean y aniquilan en fuentes de rayos X. Cuando se producen estos pares, como en el caso de la colisión de fotones γ muy energéticos y fotones X (siempre que cumplan $E_1, E_2 \geq m_e^2 c^4$), se va a producir una cascada de pares. Ello provoca dos efectos, por una parte una línea intensa en el rango de los rayos γ (511 keV), y por otra una mayor cantidad de fotones en el rango de los rayos X conforme más electrones de baja energía van apareciendo.

Además de la producción de un continuo, generado por procesos como los mencionados hasta ahora, una fracción significativa de la emisividad total de las fuentes de rayos X tiene lugar a través de líneas de emisión. Pero para producir líneas espectrales tienen que emitirse fotones con energías específicas. Esto ocurre, por ejemplo, cuando en la interacción de un electrón libre con un ión, se excita uno de los electrones ligados y pasa a ocupar un nivel de energía diferente dentro de

la estructura de capas del ión. El electrón ligado absorbe energía del electrón libre para pasar a un nivel más alto, pero como esta situación es inestable, posteriormente volverá a su nivel inferior liberando, en forma de fotón, la diferencia de energía (esta vez una cantidad fija). Un proceso similar es la ionización del átomo, o incremento del nivel de ionización de un ión, con el que colisiona el electrón libre mediante la extracción de uno de los electrones ligados en una capa interna de la estructura electrónica. El hueco generado es rápidamente cubierto por otro electrón que se encuentre en un nivel superior y emite un fotón X correspondiente a la energía liberada en la transición atómica. Así por ejemplo, si la transición electrónica se produce del nivel L ($n = 2$) al K ($n = 1$), la línea emitida se llama K_α , mientras que si la transición se produce del M ($n = 3$) al K se llama K_β (figura 166). A su vez, dependiendo desde qué subnivel se realiza la transición, se le denotará por $\alpha_1, \alpha_2, \dots$. Por supuesto, cada elemento químico, y cada uno de sus iones, tiene una serie única de líneas espectrales correspondientes a las posibles transiciones entre sus niveles de energía. Estas líneas se pueden usar para identificar los elementos que se encuentran en plasmas astrofísicos concretos así como para estudiar las condiciones de densidad y temperatura en que se hallan.

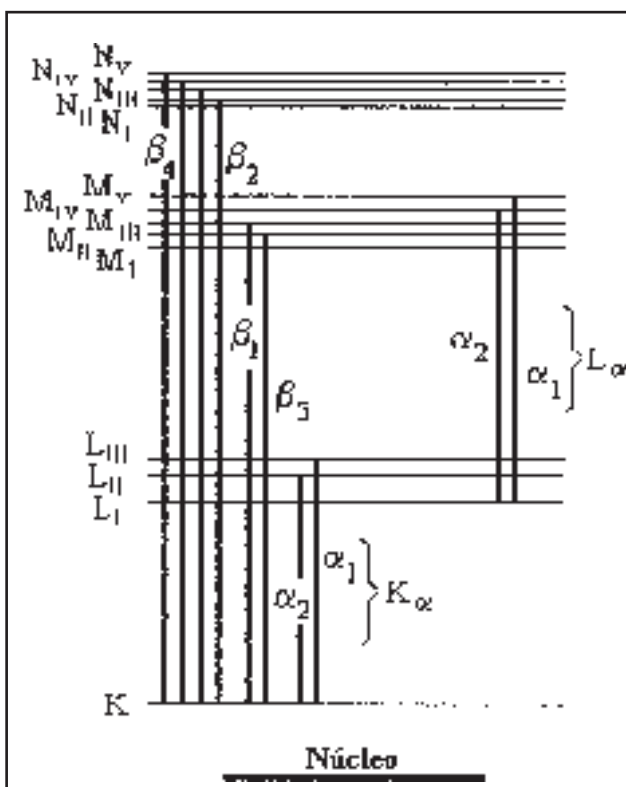


Fig. 166: Dibujo esquemático de los niveles y subniveles electrónicos, así como de algunas de las transiciones electrónicas posibles.

Cortesía de F. Ortuño-Prados (1996).

Para comprender las condiciones físicas en las que se producen los rayos X, debemos estudiar las características de los plasmas calientes que los generan a través de la medida de una serie de parámetros, tanto de la radiación continua como de las líneas espectrales, así como sus variaciones temporales. Las temperaturas electrónicas, las de los iones, la densidad del plasma, los movimientos de masas y la presencia o ausencia de equilibrio termodinámico, son algunos ejemplos típicos de los parámetros que pretendemos medir. Pero, a temperaturas muy altas, los elementos más abundantes en el Universo, como el hidrógeno o el helio, han perdido todos sus electrones. Únicamente los elementos más pesados pueden retener algunos de ellos, dependiendo de la temperatura, en las capas más internas de su estructura. El estudio de las transiciones atómicas de estos elementos químicos, que se encuentran básicamente en un estado hidrogénico o tipo helio (es decir con uno o dos electrones a su alrededor), constituye una poderosa herramienta para el estudio de las condiciones ambientales en las que tienen lugar los procesos físicos de las fuentes cósmicas. Para la Astronomía X sólo tienen generalmente interés las transiciones entre las capas más internas de iones procedentes de átomos pesados (por ejemplo Fe XXV), es decir, del material que ya está altamente ionizado, porque éstas son las transiciones que se producen en el rango X.



BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía recomendada

Ante todo decir que la bibliografía citada no pretende ser exhaustiva. Aparte de algunas obras ya clásicas existente en inglés, nos hemos permitido incluir la mayor parte de los trabajos publicados en español por ser esta una obra pensada inicialmente para el mundo hispanohablante.

General.

FERNÁNDEZ CASTRO, T. 1997, *Historia del Universo*, Editorial Espasa-Calpe, Madrid.

PÉREZ-MERCADER, J. 1996, *¿Qué sabemos del Universo?*, Editorial Debate, Madrid.

TEMPESTI, P. (dir.) 1982, *El Universo: Enciclopedia de la Astronomía*, Editorial Sarpe, Madrid. En especial los volúmenes II y III.

Capítulos I, II y III.

ASCHENBACH, B., HAHN, H.-M., TRUEMPER, J. 1996, *Der unsichtbare Himmel, Roentgenastronomie mit ROSAT*, Birkhaeuser Verlag, Basilea, Suiza.

CHARLES, P. y SEWARD, F. 1995, *Exploring the X-ray Universe*, Cambridge University Press, Cambridge.

FARMELO, G. 1996, *El descubrimiento de los rayos X*, Investigación y Ciencia, enero 1996, pág. 64.

FRANK, J., KING, A. y RAINE, D. 1992, *Accretion power in Astrophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

GIACCONI, R. 1980, *Observatorio Einstein de rayos X*, Investigación y Ciencia, abril 1980, pág. 52.

GIACCONI, R. y GURSKY, H. (eds.) 1974, *X-ray Astronomy*, Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holanda.

GORENSTEIN, P. y ZOMBECK, M. (eds.) 1990, *High resolution X-ray spectroscopy of cosmic plasmas*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

GUINIER, A. 1996, *Los extraños rayos del profesor Röntgen*, Mundo Científico, enero 1996, pág. 82.

PETERSON, L. E. 1975, *X-ray Telescopes*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 13, Annual Reviews Inc., pág. 423.

SKINNER, G. K. 1988, *Imágenes de rayos X obtenidas con máscaras codificadas*, Investigación y Ciencia, noviembre 1988, pág. 78.

SPELLER, E. y FEDER, R. 1979, *La óptica de rayos X de longitud de onda larga*, Investigación y Ciencia, enero 1979, pág. 32.

Capítulo IV.

El Sistema Solar

DROSSART, P. y MAILLARD, J.-P. 1992, *Las auroras polares de Júpiter*, Mundo Científico, abril 1992, pág. 354.

FOUKAL, P. V. 1990, *Sol cambiante*, Investigación y Ciencia, abril 1990, pág. 20.

NICOLSON, I. 1982, *El Sol*, Ed. Hermann Blume, Madrid.

RUPHY, S. 1997, *Hale-Bopp: auténtico laboratorio natural*, Mundo Científico, julio/agosto 1997, pág. 612.

ZIRIN, H. 1988, *Astrophysics of the Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

Enanas blancas

GREINER, J. (ed.) 1996, *Supersoft X-ray Sources*, Lecture Notes in Physics 472, Springer, Berlin.

KOESTER, D. y WERNER, K. (eds.) 1994, *White Dwarfs*, Lecture Notes in Physics 443, Springer Verlag, Berlin.

LA DOUS, C. 1994, *Observation and Theory of cataclysmic variables*, Space Science Reviews 67, pág. 1.

SOKER, N. 1992, *Nebulosas planetarias*, Investigación y Ciencia, julio 92, pág. 22.

Binarias de rayos-X

CANIZZO, J. H. y KAITCHUCK 1992, *Discos de acrecimiento en estrellas binarias*, marzo 1992, pág. 46.

CASTRO-TIRADO, A. J. 1991, *Nova Muscae 1991: una nova de rayos X*, Tribuna de Astronomía 65, pág. 52.

CASTRO-TIRADO, A. J. y ALCOHOLADO-FELTSTRÖM, M. E. 1993, *Descubrimiento de la contrapartida óptica de Nova Persei 1992*, Tribuna de Astronomía 90, pág. 32.

CASTRO-TIRADO, A. J. 1994, *The WATCH experiment on Granat: 1000 days exploring the X-ray sky*, Tesis Doctoral, Universidad de Copenhague.

CASTRO-TIRADO, A. J. y ALCOHOLADO-FELTSTRÖM, M. E. 1995, *GRS 1915+105: el primer microcuásar de la Galaxia*, *Tribuna de Astronomía* 121, pág. 42.

CASTRO-TIRADO, A. J. 1996, *GRO J1744-28: un nuevo tipo de fuente en la Galaxia*, *Tribuna de Astronomía* 128/129, pág. 12.

CASARES, J. 1995, *La caza de agujeros negros*, *Universo (Astronomía y Astronautica)* 9, pág. 34.

CLARK, G. W. 1977, *Estrellas de rayos X en cúmulos globulares*, *Investigación y Ciencia*, diciembre 1977, pág. 16.

GURSKY, H. y RUFFINI, R. (eds.) 1975, *Neutron stars, black holes and binary X-ray sources*, *Astrophysics and Space Science Library*, 48, Reidel, Dordrecht.

GIOVANELLI, F. y SABAU-GRAZIATI, M. D. 1992, *A0525+26/HDE 245770: a typical X-ray/Be system*, *Space Science Reviews* 59, pág. 1.

JONES, A. W. y BONNET-BIDAUD, J.-M. 1991, *Los púlsares milisegundos*, *Mundo Científico*, octubre 1991, pág. 954.

LEWIN, W. H. G. 1981, *Fuentes de brotes celestes de rayos X*, *Investigación y Ciencia*, julio 1981, pág. 38.

LEWIN, W. H. G., VAN PARADIJS, J. y VAN DER HEUVEL, E. P. J. (eds.) 1995, *X-ray binaries*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

NAGASE, F. 1989, *Accretion-Powered X-ray pulsars*, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 41, pág. 1.

ROIG, P. 1996, *Models and Astrophysical parameters of high-mass of X-ray binaries*, Tesis Doctoral, Universidad de Valencia.

PIRAN, T. 1995, *Estrellas binarias de neutrones*, *Investigación y Ciencia*, julio 1995, pág. 22.

VAN DEN HEUVEL, E. P. J. y VAN PARADIJS, J. 1994, *Binarias de rayos X*, *Investigación y Ciencia*, enero 1994, pág. 38.

VAN DER KLIS, M. 1988, *Misteriosas fuentes de rayos X en el centro de nuestra Galaxia*, *Mundo Científico*, septiembre 1988, pág. 904.

VAN DER KLIS, M. 1989, *Oscilaciones cuasi-periódicas*, *Investigación y Ciencia*, enero 1989, pág. 14.

Supernovas y emisión en rayos-X

ISERN, J., LÓPEZ, R. y SIMONNEAU, E. 1987, *La emisión de luz de las supernovas*, *Mundo Científico*, noviembre 1987, pág. 1084.

SEWARD, F. D., GORENSTEIN, P. y TUCKER, W. H. 1985, *Restos jóvenes de supernova*, *Investigación y Ciencia*, octubre 1985, pág. 62.

VEILLEUX, S., CECIL, G. y BLAND-HAWTHORN, J. 1996, *Explosiones Galácticas*, *Investigación y Ciencia*, abril 1996, pág. 46.

El centro de la Galaxia

BONNET-BIDAUT, J.-M. 1984, *Agujeros negros muy escondidos en el centro de nuestra Galaxia*, *Mundo Científico*, noviembre 1984, pág. 1122.

GEBALLE, T. R. 1979, *El pársec central de la Galaxia*, Investigación y Ciencia, septiembre 1979, pág. 36.

MIRABEL, I. F. 1993, *Un microcuásar en el centro de la Galaxia*, Mundo Científico, septiembre 1993, pág. 780.

PAUL, J., CORDIER, B., MANDROU, P. y VEDRENNE, G. 1991, *El centro de la Vía Láctea, radiografiado*, Mundo Científico, noviembre 1991, pág. 1115.

Capítulo V.

Galaxias

ANTONUCCI, R. 1993, *Unified Models for active galactic nuclei and quasars*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 31, Annual Reviews Inc., pág. 473.

BOISSÉ, P. y PETITJEAN, P. 1995, *Los cuásares, filtros del Universo*, Mundo científico, julio 1995, pág. 610.

BURNS, J. O. y PRICE, R. 1984, *Centauro-A: la galaxia activa más cercana*, Investigación y Ciencia, enero 1984, pág. 30.

CERVIÑO SAAVEDRA, M. 1998, *Galaxias con formación estelar intensa: sistemas binarios y emisión X*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid.

COURVOISIER, T. y ROBSON, E. I. 1991, *El cuásar 3C 273*, Investigación y Ciencia, agosto 1991, pág. 10.

DISNEY, M. J. y VÉRON, Ph. 1977, *Objetos BL Lacertae*, Investigación y Ciencia, octubre 1977, pág. 14.

DUCCIO MACCHETO, F. y DICKINSON, M. 1997, *Las galaxias del Universo joven*, Investigación y Ciencia, julio 97, pág. 52.

MUSHOTZKY, R. F., DONE, C. y POUNDS, K. A. 1993, *X-ray spectra and time variability of active galactic nuclei*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 31, pág. 717.

PETERSON, C. 1997, *An introduction to AGN*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

REES, M. 1991, *Agujeros Negros en los centros de las galaxias*, Investigación y Ciencia, enero 1991.

SOL, H. 1988, *Los chorros de las galaxias*, Mundo Científico, junio 1988, pág. 604.

WOLTJER, L., VÉRON, P. y VÉRON-CETTY, M. P. 1992, *Los cuásares*, Mundo científico, diciembre 1992, pág.130.

Cúmulos de galaxias

ARNAUD, M. y LACHIEZE-REY, M. 1991, *Los cúmulos de galaxias, escrutados en rayos X*, Mundo Científico, junio 1991, pág. 674.

CASTRO-TIRADO, A. J. 1990, *Macroestructuras del Universo: cúmulos y supercúmulos de galaxias*, Sirius, Madrid.

CASTANDER, F. 1996, *X-ray studies of high redshift galaxy clusters*, Tesis Doctoral, Universidad de Cambridge.

SARAZIN, C. L. 1988, *X-ray emission from clusters of galaxies*, Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.

SEITTER, W.C. (eds.) 1994, *Cosmological Aspects of X-ray clusters of galaxies*, NATO ASI Series, Kluwer, Dordrecht.

El fondo de radiación X.

BARCONS, X. 1997, *Rayos X del Universo extragaláctico*, Tribuna de Astronomía 134, pág. 14.

CEBALLOS MERINO, M. T. 1996, *Distribución y propiedades espectrales de fuentes extragalácticas de rayos X*, Tesis Doctoral, CSIC, Universidad de Cantabria.

FABIAN, A. y BARCONS, X. 1992, *The origin of the X-ray background*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 30, Annual Reviews Inc., pág. 429.

MARGON, B. 1983, *Origen de la radiación cósmica de fondo*, Investigación y Ciencia, marzo 1983, pág. 86.

MOTCH, C. y HASINGER, G. 1992, *Rosat y el fondo difuso de rayos X extragaláctico*, Mundo Científico, Octubre 1992, pág. 856.

Capítulo VI.

Misiones

ALLEN, J. S. 1998, *X-ray Astronomy Missions*, en Internet (<http://legacy.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions.html>). Importante para la actualización de la información sobre las misiones futuras discutidas en este libro.

GARCÍA PRIMO, M. A. 1997, *Programa Español de Minisatélites*, Mundo Científico, abril 1997, pág. 342.

GIMÉNEZ, A. 1990, *XMM: una misión europea para Astronomía de rayos X*. Curso sobre *Astronomía Espacial en los 90*, Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Valencia, pág. 10.

GIMÉNEZ, A. 1992, *Spectrum X/T : misión al Universo violento*, Tribuna de Astronomía 77, pág. 32.

MORALES, C., GOMEZ, J. F. y TRAPERO, J. 1996, *EURD en MINISAT-01*, Tribuna de Astronomía 133, pág. 14.

Explosiones cósmicas de rayos-gamma

CASTRO-TIRADO, A. J. y ALCOHOLADO-FELTSTRÖM, M. E. 1992, *GRBs: Explosiones Cósmicas de rayos gamma*, Tribuna de Astronomía 79, pág. 10.

GOROSABEL, J. 1996, *Explosiones cósmicas de rayos gamma: Estudio del primer catálogo de WATCH*, Tesina de Licenciatura, Universidad Complutense, Madrid.

SCHAEFER, B. E: 1985, *Fuentes explosivas de rayos gamma*, Investigación y Ciencia, abril 1985, pág. 103.

Detectores

FRASER, S. 1993, *X-ray Detectors*, Cambridge University Press, Cambridge.

ORTUÑO, F. 1996, *Microstrip Gas Chambers: estudios sobre distintos substratos*, Tesina de Licenciatura, Universidad de Barcelona.

Apéndice.

LONGAIR, M. S. 1992, *High-Energy Astrophysics*, Cambridge University

Índice Onomástico

A

Abbe 66
Abell 192
Alen 118, 119, 238
Alpar 151
Aschebach lámina 10
Auger 249

B

Baade 145
Baez 67, 237
Balmer 132, 181
Barcons 199
Belian 55, 153
Benítez 215
Bessel 135
Blaauw 150
Boldt 52, 70
Bolton 138
Boltzmann 241
Bond 213
Bondi 135
Bowyer 32
Bragg 29, 56
Brandt 103, 158
Burnight 27, 124
Byram 181

C

Callanan 161
Canizares 72, 178
Casares 157, 161
Cash 237
Castander 195
Castro-Tirado 215
Cecil lámina 18
Centurión 215
Clark 37, 72
Clark, A. 135
Cominsky 64
Compton 20
Conner 55, 153
Copérnico 51
Corcoran lámina 9
Costa lámina 24
Cui 217
Culhane 131

CH

Chandrasekhar 135
Chen 217
Chodil 156
Christensen 235
Churazov 166

D

de Broglie 20
Dempsey 132
Dicke 105
Doppler 184

E

Eckart 169
Eddington 135, 139, 144
Einstein 72
Elvis 58
Ellis 195
Evans 55, 153

F

Fabbiano 178, 179
Fabian 188
Faith 180
Ferrarese 187
Filippenko 161
Fisher 37
Fishman 170
Fockenbrock 215
Forman 193
Fowler 135
Frank 134
Fraser 239
Friedman 29, 34, 37, 105, 124, 181
Fritz 192

G

Gabor 67
Gagné lámina 7
Galilei 21
García 142
Gaunt 247
Geiger 33
Gendreau 199
Genzel 169
Gershberg 159
Giacconi 32, 37, 47, 66, 71, 127, 165, 239, 240
Gladstone lámina 2
Golenetskii 97
Gorenstein 72
Gorosabel 215
Greiner 217
Grindlay 55, 153, 233
Gursky 32, 72, 192

H

Halpern 145
Harries 156
Hartman 183
Hasinger 150, 198

Heise 55, 136, 153
Heisler 191
Henriksen 195
Herschel 22
Hind 138
Hoffman 153
Holt 54
Hubble 175
Hulse 152
Humason 135

I

Inoue 141

J

Jones 193

K

Kahabka 177
Kepler 137
King 134
Kirkpatrick 67, 237
Kohmura 142
Kouveliotou 170
Kraft 138

L

Lagrange 134
Lamb 151
Landau 144
Lewin 58, 153
Lindsag 68
Lippershey 21
Lisse lámina 3
Lockman 198, lámina 23
Lund 102, 103, 158
Lundmark 175

M

Margon 135
Mark 176
Markarian 178
Marshall, F. 58, 153
Marshall, H. 145
Martin 145
Martínez González 215
Mattei 138
Mazets 97
McClintock 58, 154
McNamara lámina 21
Meekins 192
Menten 169
Mertz 102
Metzger 215
Michelson 237
Mirabel 162, 164
Mitchell 194
Montesinos 127

Murakami 117
Murray 195
Mushotzky 195

N

Novikov 35

O

Oda 35
Öpik 175
Ortuño-Prados 250

P

Palumbo 179
Paolini 32
Paciesas 159
Pavlenko 159
Petre lámina 16
Pietsch 177
Plank 26, 243
Pravdo lámina 11
Preibisch lámina 5
Prehdel lámina 8
Price 176
Priedhorsky 46
Prince 233

R

Raine 134
Rappaport 72, 138
Rayet 31
Reglero 211
Remillard 58
Robinson 249
Roche 133, 134
Rodríguez 162, 164
Röntgen 19
Rossi 32, 37, 66, 216
Rothschild 54
Rutherford 68

S

Saba 54
Sandage 36
Sarazin 193
Schmidt 180, 181
Schmitt 127, lámina 8
Schnopper 102, 222
Selermitsos 54
Seyfert 180
Shaham 151
Shakura 137
Shibazaki 151
Shklovsky 36
Shlyapnikov 159
Snell 70
Snowden lámina 16
Stanley 140

Stefan 243
Stella 217
Strüder 235
Sunyaev 101, 137, 195
Supper lámina 14

T

Tanaka 117, 190
Tananbaum 232
Taylor 152
Terekhov 126
Terrel 46
Trincheri 178, 179
Trümper 96, 155, 235
Turner 232, 234

V

van der Heuvel 149
van der Klis 92, 150
van Paradijs 55
Vietri 217
Voges 143, 167, lámina 19
Vogler 177
von Laue 20

W

Waite lámina 2
Watson 75, 232
Wheeler 145
White 58, 232
Wien 27
Wirk 175
Wolf, C. 215
Wolf, M. 190
Wolter 68
Woltjer 189
Wood 64

Z

Zdziarski 200
Zeldovich 36, 195
Zhang 107, 217
Zimmermann lámina 17
Zwicky 135, 144, 186

Índice de Materias

A

Absorción de la atmósfera 24
Absorción fotoeléctrica 136, 248
 bandas de absorción 248
 electrón Auger 249
 fluorescencia 128, 248
 umbrales de absorción 248
Absorción libre-libre 247
Absorción sincrotrón 246
Acrecimiento de materia 147
Agujeros negros
 estelares 157, 161
 supermasivos 187, 190
Agujero de Lockman 198, lámina 23
Amortiguadores de Lyman- α 189
Anomalía del Atlántico Sur 25
Anticoincidencia 37

B

Bandas de absorción *Ver* Absorción fotoeléctrica
Binarias de rayos X 144
 baja masa 146
 origen y evolución 152
 masivas 146
 sistemas Be 146
 supergigantes 146
 origen y evolución 152
Blázares 185
Bremsstrahlung *Ver* radiación de frenado
Bulbo galáctico 146
Burbuja local 197

C

Cámaras CCD 206
 DPAD 234
 MOS 207, 227
 pn-CCD 227
Cámaras de diafragma 105
Centelladores 39, 79, 80
Centro Galáctico 51, 87, 103, 167, lámina 12
Colectores 52
Colimador 35, 36
 por modulación 56
 RMC 102
Condición del seno de Abbe 66
Contador Geiger 29, 33, 36
Contador proporcional 36, 37
 de centelleo en gas 90
 de tipo MSPC 222, 230
 multihilo 78
 sensibles a la posición 78
Corrimiento al Rojo 181
Cuásares 186
Cuerpo negro 26, 243, 244
Cúmulo de estrellas 133

Cúmulos de galaxias 48, 191

D

Detector ideal 239
Detectores de estado sólido 233, 238
Difusión Compton 80, 156, 245, 247
Difusión Compton inversa 247
Difusión Thompson 247
Disco de acrecimiento 137
 modelo estándar 137
 radio de circularización 137

E

Efecto Compton *Ver* Difusión Compton
Efecto Compton inverso *Ver* Difusión Compton inversa
Efecto Doppler 146, 170, 184
Efecto fotoeléctrico *Ver* Absorción fotoeléctrica
Efecto Lense-Thirring 217
Efecto Sunyaev-Zeldovich 195
Electrón Auger *Ver* Absorción fotoeléctrica
Emisión Coronal 129
Emulsión Fotográfica 27, 124
Enanas blancas 135
 aisladas 135
 en sistemas binarios 138
Erupciones de rayos X 48, 54, 156
 tipo I 155, 170
 tipo II 155, 170
Espectro electromagnético 22
 absorción atmosférica 24
 introducción 22
Espectrómetro Bragg 29, 56, 57, 226
Espectrómetro de centelleo 100
Espejos anidados 71, 109
Estrellas activas 129
Estrellas de neutrones 144
 aisladas 144
 en sistemas binarios 144
Estrellas ráfaga 31, 131, 132
Estrellas Wolf-Rayet 31, 164
Extremo ultravioleta 92, 136
Explosiones cósmicas de rayos gamma (GRBs) 45, 113, 117, 214
Explosiones cósmicas de rayos gamma suaves 117

F

Fluorescencia *Ver* Absorción fotoeléctrica
Focalización relativista del haz 185
Fuentes supersuaves 74, 139, 176
Fuentes transitorias de rayos X 156
Fulguración solar 125
 fase de pre-erupción 125
 fase impulsiva 125
 fase gradual 125

Función de masa 157

G

Galaxias activas (AGNs) 48, 180

blázares

objetos BL Lac 185

objetos OVV 185

cuásares con baja radioemisión 186

galaxias X con líneas de emisión 188

radiocuásares 184

radiogalaxias 183

BLRGs 183

NLRGs 184

regiones nucleares con líneas de

baja ionización 185

Seyfert 1 58, 186, 188

Seyfert 2 187

Galaxias con brotes de formación estelar 178

con actividad extendida 179

con actividad nuclear 179

H II 179

Galaxias IRAS brillantes 189

Galaxias normales 176

elípticas y lenticulares 177

espirales 176

espirales de baja luminosidad 177

H

HDF 200

L

Ley de potencias 182, 246

Ley de Hubble 181

Ley de Kepler 137

Ley de Wien, 27

Líneas espectrales 249

de emisión 95, 131, 143, 165, 167, 187, 190,
194, 250

de absorción 96

Lóbulos de Roche 133, 134, 137, 150

Luminosidad límite de Eddington 148, 151, 155

M

Máscara codificada 105, 229

Microcalorímetros 224, 236

Microcuásar 164

Modelo unificado de AGNs 191

Multicapas 234

N

Nomenclatura de fuentes de Rayos X 34

Novas 31, 139

de rayos X 38, 156

O

Obtención de imágenes por medio de

ocultación 107

Oscilaciones cuasi periódicas 96, 150, 171

diagramas color-color 150

frecuencia de batido 151

fuentes atolón 150

fuentes Z 150

P

Pares electrón-positrón 249

Placas microcanal 76

Plasma 244

Polarímetro de rayos X 61

Púlsares de rayos X 148, 170

Puntos de Lagrange 134

R

Radiación de cuerpo negro (térmica) 26, 144, 170

Radiación de fondo 33, 58, 196

Radiación de frenado (Bremsstrahlung) 184, 245

Radiación sincrotrón 62, 245, 246

Radioastronomía 22

Radio gravitacional 147, 190

RASS 110, 111, lámina 13

Rayos X

absorción 143

descubrimiento 19

primeras imágenes astronómicas 67

primeras medidas 28

Recombinación radiativa 245, 248

Redes de transmisión 226, 228

Reflexión total externa 70

RIXOS 195

S

Sol 124

Supercúmulos de galaxias 196

Supernovas 27, 34, 139

T

Técnica de Multiplexado 105

Técnica de ocultación por el limbo terrestre, 107

Telescopios de rayos X 67, 208

de láminas delgadas 208

tipo Wolter 1 68, 69, 218, 226, 227

tipo Wolter 1 modificado 112

tipo Wolter 2 69

U

Ultravioleta 132

Umbrales de absorción *Ver* Absorción fotoeléctrica

V

Variables cataclísmicas 31, 92, 138

novas clásicas 139

novas enanas 139

novas recurrentes 139

tipo nova 139

Índice de Lanzadores, Satélites e Instrumentos

Los lanzadores figuran con caracteres en negrita y los satélites en cursiva.

A

A4, 63
ABRIXAS 207, 218, 238
ACIS 226
Aerobee 150 27, 32, 192
Alexis 118, 119, 209, 210
ANS 54, 118, 119
Apollo 16 50
Apollo-Soyuz 59, 118, 119
Argos 212, 238
Ariane 5 228
Ariel-5 55, 61, 118, 119, 131, 156, 165, 192, 239
Ariel-6 (UK-6) 84, 118, 119
ART-P 101, 165
ART-S 101
Aryabhata 59, 118, 119
Asca (Astro-D) 116, 117, 118, 119, 128, 133, 142, 143, 155, 184, 197, 205, 239
ASM 96, 217
Astro-I 111
Astro-B. Ver Tenma
Astro-C. Ver Ginga
Astro-D. Ver Asca
Astro-E 118, 224, 238
Astro-F 231
Astron 97, 118, 119
Atlantis 113
Atlas-2 87
Atlas-Centauro 63, 72, 212
AXAF 220, 224, 238, 239
AXAF-I 226
AXAF-S 226

B

BATSE 107, 114, 170
BBFS 74
BBXRT 111, 112, 113, 118, 119, 208
BeppoSAX 118, 119, 208, 212, 239

C

CATSAT 218, 219, 238
CGRO 113, 220, 225
Cluster 31
Cluster-2 (Phoenix) 227
CMA 90

Columbia 111, 141
CONSTELACION 231, 232, 238
Copérnico 51, 68, 118, 119
COS-B 144
Cosmos 208 46
Cosmos 215 46
Cosmos 262 46
Cosmos 264 46
Cosmos 428 50, 118, 119
Cosmos 461 50
Cosmos 561 50
Cosmos 731 50
CXE 63

CH

Challenger 85, 87

D

Delta 231
DGS 218
Discovery 87
DSN 229
DXS 116, 118, 119

E

Einstein (HEAO-2) 71, 72, 73, 103, 111, 118, 119, 128, 129, 140, 165, 176, 197, 239, 240
Endeavour 116
EPIC 227
ESRO-2B. Ver Iris
Estación Espacial Internacional 231, 233
Eureca 114, 116, 118, 119
EUVE 144
EXIST 231, 233
Exosat 47, 88, 118, 119, 129, 151, 184, 208, 239
Explorer-42. Ver Uhuru
Explorer-53. Ver SAS-3

F

FILIN 58, 97
FREGATE 219
FUVITA 223

G

Galileo 31, 206
GBD 96
GBM 213
Ginga (Astro-C) 95, 111, 118, 119, 141, 152, 187, 197, 239
Giotto 206

GIS 117
Glazar 100
Granat 101, 114, 118, 119, 165
GRASP 229
GSPC 90, 94

H

Hakucho 83, 94, 118, 119, 151, 154, 239
HEAO-1 63, 118, 119, 131, 192, 217, 239
HEAO-2. Ver Einstein
Helos 88
HEPC 222
HETE-1 219
HETE-2 219, 220, 238
HEXE 100
HEXTE 217
Hinotori 94
Hipparcos 31
HPGSPC 213
HRC 226
HRI 73, 76, 109
HTXS. Ver CONSTELACION
Hubble (HST) 31, 141, 144, 200, 206, 220, 225
HXD 224
HXR 219
HXT 114
HXTM 233

I

IBIS 229
INTEGRAL 229, 238
IPC 73, 77
Iris (ESRO-2B) 46, 88, 118, 119
IRS-P3 209
ISEE-3 (ICE) 65, 118, 119
IUE 47

J

JEM 234
JEM-X 229
JET-X 223

K

KFRD 222
KONUS 102, 155, 210
Kuiper 169
Kvant 97, 118, 119, 165

L

LAC 95
LASS 63, 64
LCT 234
LE 90
LECS 212
LEGRI 211
LEPC 222
LETG 226
LILAS 101, 219

M

M-V 224, 231
Mars 96 31
MART-LIME 223
MAXI 231
MC 63
ME 89
MECS 212
Minisat-01 211, 238
Mir 97, 99, 141, 165
MMT 233
MOXE 223
MPC 74
MSPC 222
M-3S 224

N

NTT 168

O

OA0-3. Ver Copérnico
OGO-5 44, 118, 119
OMC 229
OSO-3 43, 118, 119
OSO-4 43, 118, 119
OSO-5 43
OSO-7 50, 51, 118, 119
OSO-8 61, 118, 119, 194
OSSE 200
OXS 222

P

P78-1 85
PCA 217
PDS 213
Pegasus 211
PHEBUS 102, 126
Phobos-1 100, 118, 119
Phobos-2 100, 118, 119
PIPS 218
Protón 101
PSD 90
PSPC 94, 109
PULSAR X-1 100

R

Radioastron 221
RF-15 100
RGS 227
Rosat 108, 118, 119, 126, 130, 131, 133, 136,
144, 166, 175, 197, 218, 239, 240
Rossi XTE 118, 119, 152, 171, 216

S

S-150 53
Salyut-4 58, 97, 118, 119
SAS-1 47, 50
SAS-2 47

SAS-3 (Explorer-53) 47, 60, 118, 119, 131,
136, 138, 155, 165, 239

SAS-4. Ver IUE

Saturno 53

Scout 47, 54, 60, 62

SHARP 168

SIGMA 101, 162, 165

Siren-2 100

SIRTF 225

SIS 117

SIXA 222

SKR-02M 97

Skylab-3 53, 54, 59, 65, 72, 118, 119

Skylark 106

SL-2 87

SMM 85

SODART 221

Soho 227

Solar-A. Ver Yohloh

Solar-B 224

Spacelab-1 85, 118, 119

Spacelab-2 87, 107, 118, 119

SPI 229

SPARTAN-1 87, 118, 119, 212

Spectrum UV 221

Spectrum X/T 208, 220, 222, 238, 239

SPI 229

Sputnik 24

SSS 74

SXC 219

SXPP 222

SXR 218

SXT 114

T

TAUVEX 222

TD-1A 51, 118, 119

Telescopio Espacial Hubble. Ver Hubble

Tenma (Astro-B) 94, 118, 119, 239

TGRS 209

TGS 90

Thor-Delta 51

TTM/COMIS 99

U

Uhuru (Explorer 42) 47, 50, 55, 60, 63, 73, 118,
119, 176, 181, 192, 239, 240

UKIRT 163

Ulysses 118, 119

USA 212

V

V2 29, 124

Vela 5A 44, 118, 119, 131, 214

Vela 5B 44, 118, 119, 131, 214

Vela 6A 44, 118, 119, 131, 214

Vela 6B 44, 118, 119, 131, 214

Venera 11 97, 118, 119, 155

Venera 12 97, 118, 119, 155

Venera 13 97, 118, 119

Venera 14 97, 118, 119

VLA 168

W

WATCH 102, 103, 114, 158, 162

WFC 110, 213

Wind 118, 119, 209, 210

WXM 219

X

XAP 219

Xeus 234

XIS 224

XMM 93, 207, 208, 227, 238, 239

XRS 224

Y

Yohkoh (Solar-A) 114, 115, 124

Índice de Objetos

1E 0630+178 144
1E 1740.7-2942 103, 165, 166
1E 1742.5-2859 166
1SAX J0653 + 7917 34
3C 273 39, 49, 61, 65, 180, 181, 184
3C 279 185
4U 1322-42 34
4U 1636-536 155
4U 1735-44 154
4U 1820-30 149, 152
4U 2129+47 34

A

A 0620-00 (Nova Monocerotis 1975 = V 616 Mon)
58, 59, 156, 157, 158
A 1118-61 57
A 1742-289 75, 165, 167
A 1742-294 75, 165
Abell 30 136
Abell 2256 193
Algol 61, 130
AM Her 60, 65, 138, 139
AR Lac 130

B

BL Lac 185

C

Cangrejo (Crab) 34, 38, 48, 49, 62, 65, 74, 140,
143, lámina 11
Capella 55, 131, 132
Cas A 140, 184
Cen A (NGC 5128) 34, 39, 52, 65, 74, 181
Cen X-2 38, 156
Cen X-3 49, 65, 148, 149, 152
Cen X-4 46, 154, 156
Cir X-1 59
CI 0016+16 195
Coma (A 1656) 49, 65, 87, 192, 193, 195
Crux X-1 156
Cyg A 49, 184
Cyg X-1 34, 46, 49, 51, 59, 64, 65, 75, 148,
157
Cyg X-2 87
Cyg X-3 49, 51, 65, 75, 164

D

DQ Her 139

E

Eta Carinae lámina 9
EX Hya 69

G

Galaxia (Vía láctea) 23
GCX (= SGR X-1) 164, lámina 12
Geminga 144, 145
GQ Mus 138, 139
Gran Nube de Magallanes 49, 65, 140, 175, lámina
16
GRB 700822 45
GRB 970228 213, lámina 24
GRB 970508 213, 214
GRB 971214 213
Grindlay 1 157
GRO J0422+32 (Nova Persei 1992 = V 518 Per)
107, 108, 157, 158, 160, 162
GRO J1655-40 157
GRO J1744-28 167, 170
GRS 1124-68 (Nova Muscae 1991) 103, 157,
158
GRS 1756-268 166
GRS 1915+105 103, 158, 162, 217
GS 2000+25 157
GS 2023+338 (Nova Cygni 1989 = V404 Cyg)
157, 158
GX 0.2-0.2 75
GX 1+4 166
GX 3+1 75
GX 339-4 65
GX 354+3 51
GX 354-0 166
GX 5-1 92, 150, 166, lámina 8

H

H 1705+25 157
Hale-Bopp 128
HE 1029-10401 186
Her X-1 49, 51, 65, 96, 97
Hyakutake 128, lámina 3
HZ 43 60, 135, 136
HZ 43B 136

I

IC 443 51, 140
IRAS 09104+4109 189
IRAS 15564+6359 179

J

Júpiter 128, lámina 2

K

KPD 0005+5106 136

L

Liller 1 154

LMC *Ver* Gran Nube de Magallanes

LMC X-1 157

LMC X-3 157

Luna 34, 126, 127, 197, lámina 8

M

M 27 136

M 31 (Andrómeda) 49, 65, 74, 111, 176, 177,
197, lámina 14, lámina 15

M 33 176, 197

M 42 lámina 7

M 49 lámina 19

M 51 179

M 58 lámina 19

M 60 lámina 19

M 77 *Ver* NGC 1068

M 81 142, lámina 17

M 82 179

M 83 179

M 86 177, lámina 19

M 87 38, 39, 175, 192, lámina 19

M 89 lámina 19

M 106 *Ver* NGC 4258

MGC 6-30-15 118, 119

MXB 1659-29 65

N

NGC 1068 (M 77) 180, 187

NGC 1275 39, lámina 21

NGC 246 136

NGC 253 179, 180

NGC 2992 188

NGC 3783 49

NGC 4151 34, 65, 181, 187

NGC 4258 186, lámina 18

NGC 4261 187

NGC 4472 178

NGC 4565 177

NGC 5128 *Ver* Cen A

NGC 5548 186

NGC 6624 49, 55, 65, 153

NGC 6946 179

NGC 6992-95 52, 72, 140, lámina 10

NGC 7714 178

Norma 153

Nova Muscae *Ver* GRS 1124-68

Nova Persei 1992 162, 165, 166. *Ver* GRO
J0422+32

O

Orión lámina 6

P

Pequeña Nube de Magallanes 49, 74, 176

Perseus (A 426) 39, 49, 65, 87, 192, 194, lámina
20

PKS 0558-504 185

PKS 2155-304 65, 185

Pleyades 130, lámina 4, lámina 5

PSR 1953+29 152

Puppis-A 52, 140

R

Rapid Burster *Ver* X 1730-335

RS CVn 64, 65, 130, 135

RX J1347.5-1145 194

S

Sco X-1 32, 36, 39, 49, 51, 59, 56, 65, 126,
146, 152, 156, 165

Sco X-2 34

Sco X-3 34

SGR 0525-66 97

SGR 1806-20 117, 155

Sgr A 75, 169

Sgr A* 166, 168

Sgr X-1 *Ver* GCX

Sirius 55, 135

Sirius B 135

SLX 1736-289 166

SMC *Ver* Pequeña Nube de Magallanes

SMC X-1 59

SN1006 140

SN1972e 51

SN1987A 96, 140, 141

SN1993J 142, lámina 17

Sol 28, 29, 68, 72, 85, 94, 114, 124, 197, 130,
lámina 1

SS 433 34, 65, 148, 164

SS Cyg 64, 138

SU UMa 139

T

Tau X-1 *Ver* Cangrejo

Terzan 2 166

TY Pyx 130, 131

Tycho 91, 140

U

U Gem 64, 138

Ultrarrápida *Ver* X 1730-335

UV Cet 55

UX UMa 139

V

V0331+53 96

V404 Cyg *Ver* GS 2023+338

Vela 140

Vela X-1 65, 152

Velo *Ver* NGC 6692-95

Virgo (cúmulo) 49, 65, 72, 192, lámina 19

VW Cep 65

VY Scl 139

X

X 0716+714 185

X 1730-335 60, 154

X Per 65

Y

YZ CMi 55

Z

Z Cam 139

LÁMINAS EN COLOR

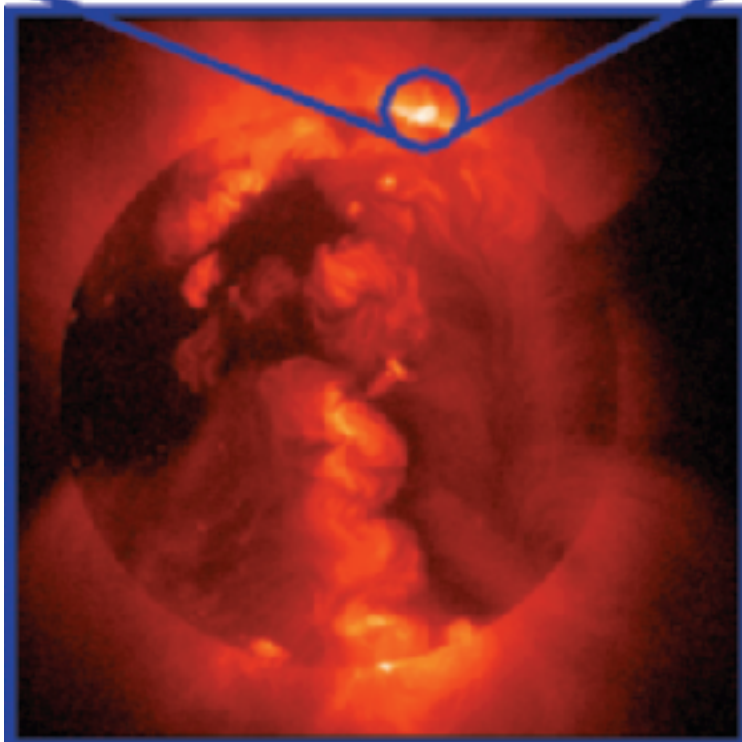
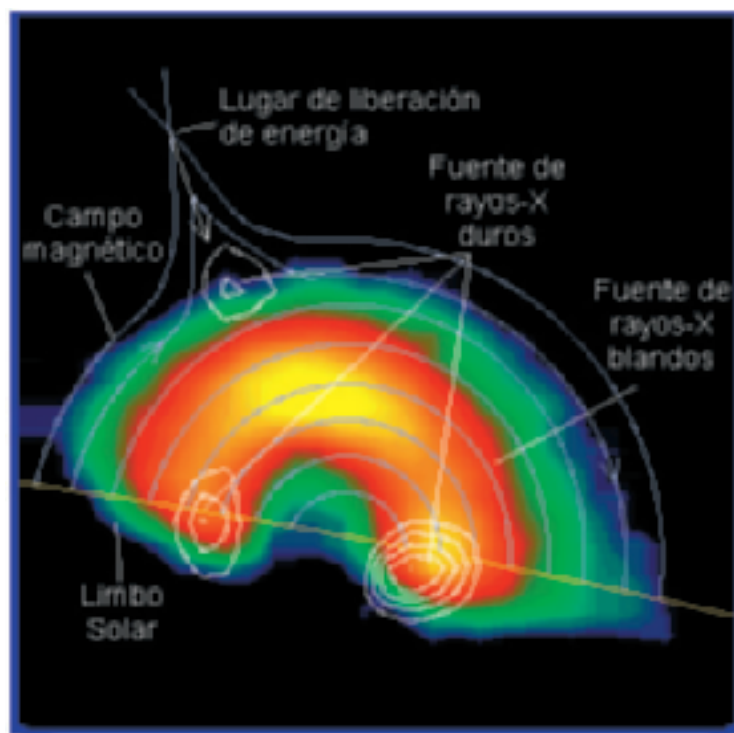


Lámina 1: Imagen del Sol en rayos X por el satélite *Yohkoh* el 13 de enero de 1992. Se detalla una de las fulguraciones solares (*flare*) en la que se indican las zonas donde se origina la emisión en rayos X. Cortesía del equipo científico del *Yohkoh* (ISAS, Japón). Información adicional en *X-ray solar physics from Yohkoh*, Universal Academy Press, Tokio (1994).

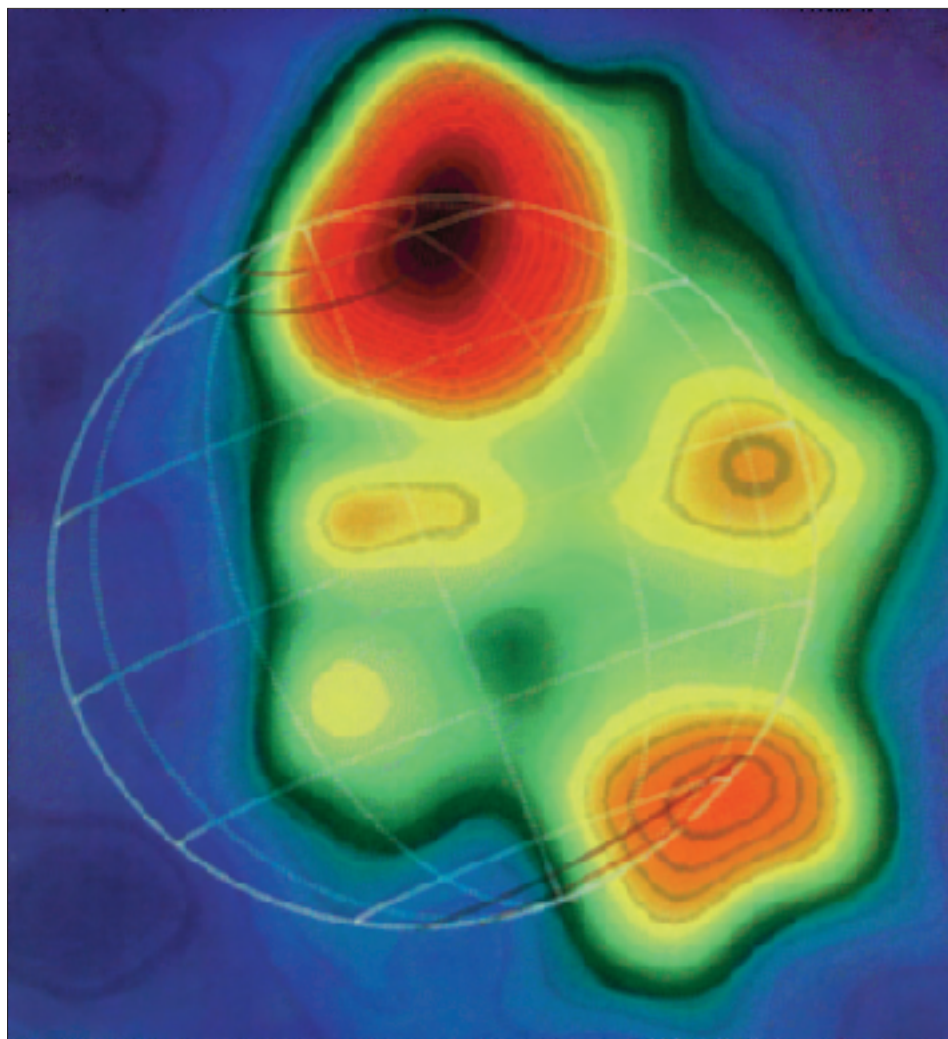


Lámina 2: Imagen por *Rosat* en rayos-X blandos resultante de la observación de Júpiter antes y durante el impacto del cometa Shoemaker-Levy el 9 de julio de 1994. Nótese la variación de la emisión X joviana según el tiempo local, indicando que los rayos-X debidos a las auroras y los producidos en el ecuador son más intensos durante la tarde joviana (derecha de la imagen) que durante la mañana. Cortesía de H. Waite y R. Gladstone (Southern Research Institute, EE.UU.). Más detalles en el trabajo de J. H. Waite y colaboradores, en *Roentgenstrahlung from the Universe*, MPE Report 263, pág. 641 (1996).

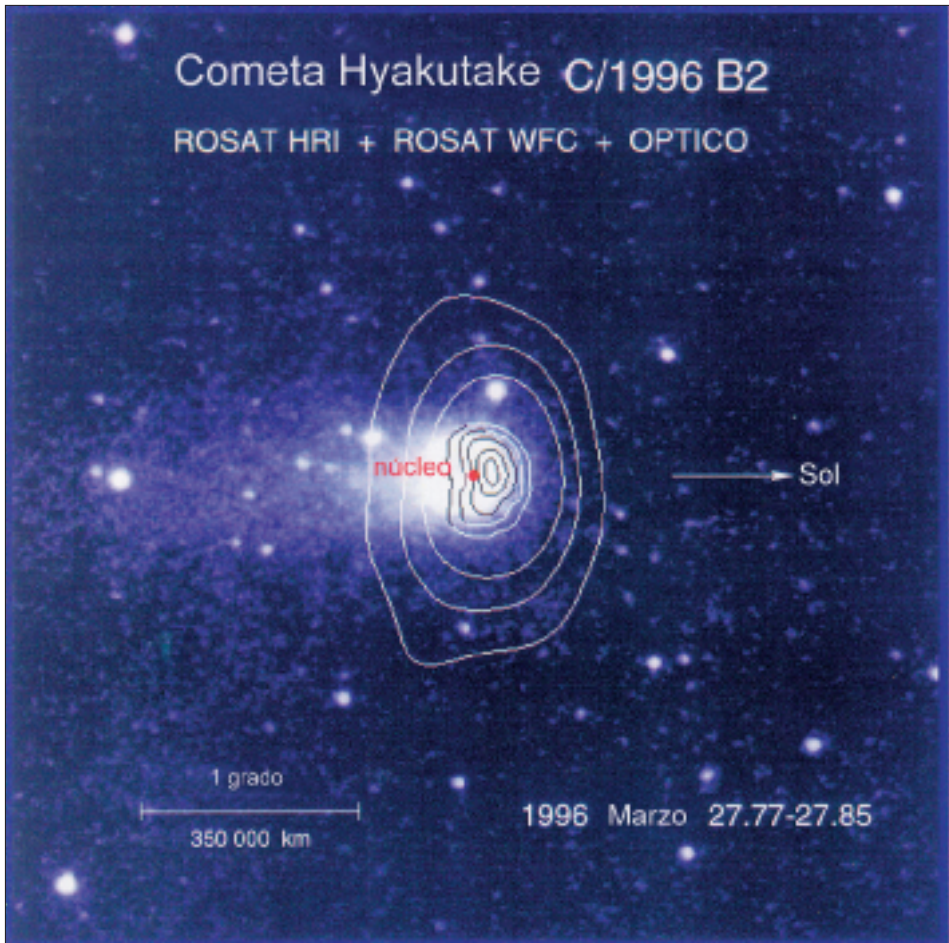


Lámina 3: El cometa C/1996 B2 (Hyakutake) visto por *Rosat* el 27 de marzo de 1996. Sobre la imagen óptica, obtenida simultáneamente a la emisión X, se han superpuesto las líneas de contorno, tanto de la emisión ultravioleta (las tres más externas) como de la emisión de rayos X (las cinco más internas). Éstas últimas confirman que la emisión proviene mayormente del lado de la coma cercano al Sol, y no del núcleo (el punto rojo). Todas las imágenes, salvo que se indique lo contrario son cortesía del Instituto Max Planck para Física Extraterrestre (Garching, Munich, Alemania). Más información en el trabajo de C. M. Lisse y colaboradores en *Science*, 274, *American Association for the Advancement of Science*, Washington, pág. 205 (1996).



Lámina 4: Imagen en el óptico del cúmulo abierto de las Pléyades (M 45), obtenida con un telescopio Schmidt desde tierra. Comparar con la imagen de rayos-X que se muestra en la lámina 5.

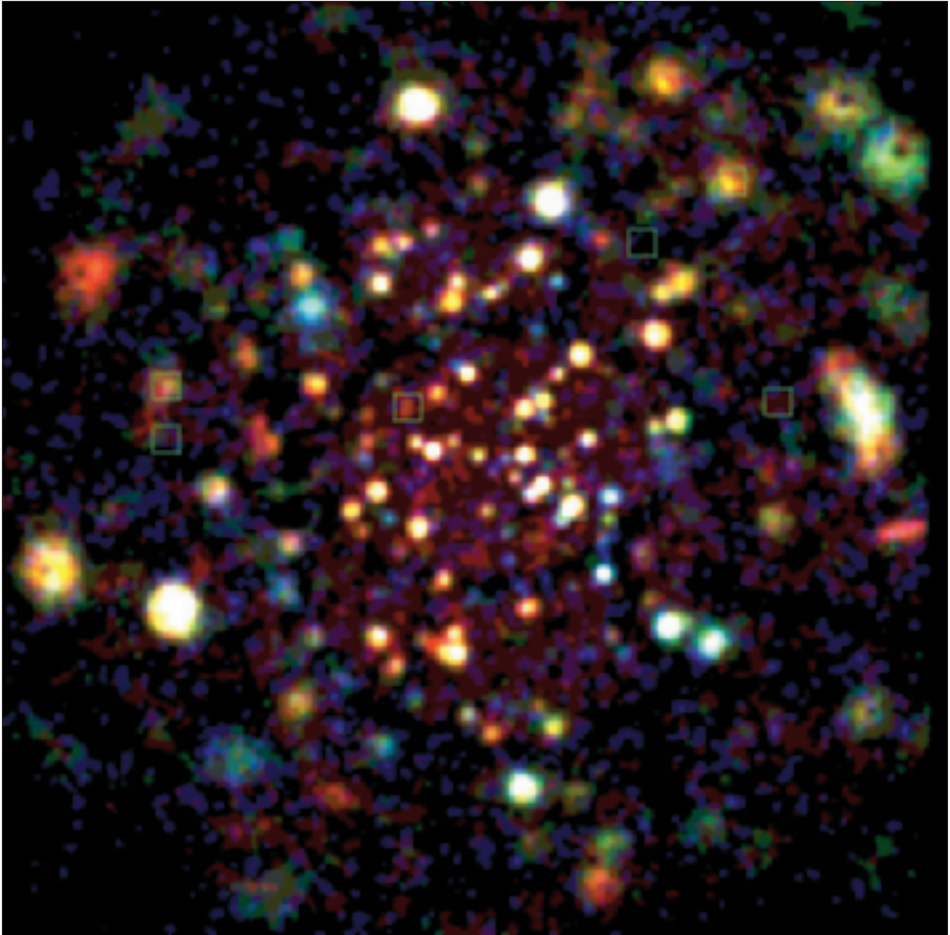


Lámina 5: Imagen del PSPC de *Rosat* de las Pléyades. El campo tiene un radio de 40'. Nótese como se va degradando la imagen conforme uno se acerca al borde del mismo. Más de un centenar de astros se detectan en esta imagen. Se observan todas las estrellas con tipos más tardíos que G_0 y solamente un 35% de las de tipo B, A y F. Alrededor de un tercio de las fuentes X no tienen contrapartida óptica evidente. Los cuadrados indican las estrellas más brillantes en el visible, tal como aparecen en la lámina anterior. Cortesía de Th. Preibisch (Universidad de Würzburg, Alemania).

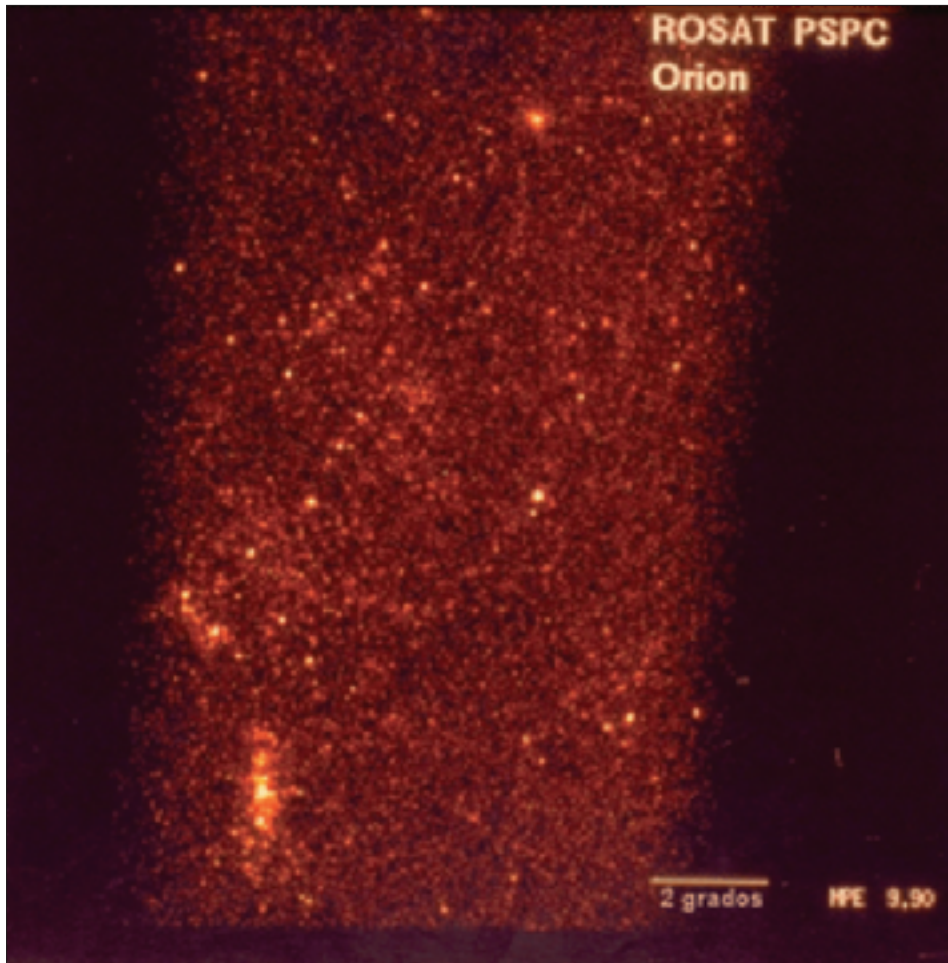


Lámina 6: La zona de Orión durante el RASS de *Rosat*. Nótese como la forma inconfundible de la constelación, con «las Tres Marías» y «la daga» con M 42 también se mantiene en rayos-X.

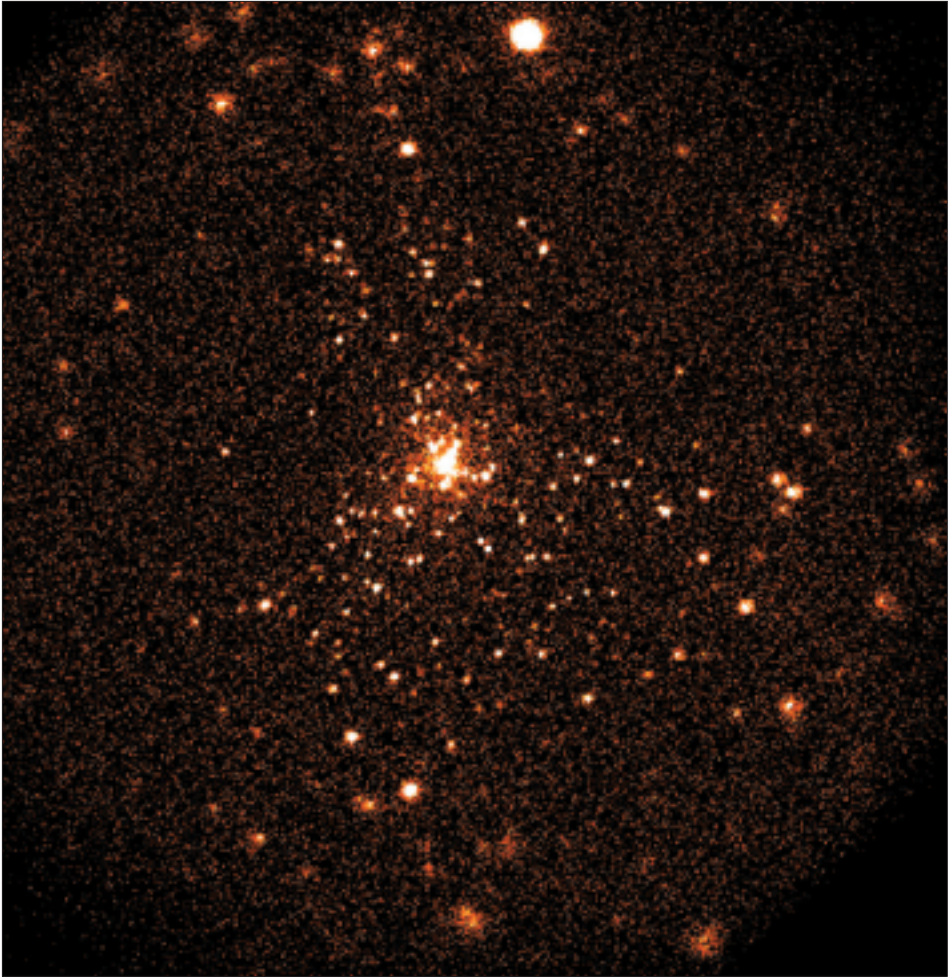


Lámina 7: Observación de la Gran Nebulosa de Orión M 42 (a 1.400 años-luz de distancia) con el HRI. El campo es de 40' x 40' centrado en el Trapecio. La cuarta parte de los 389 objetos detectados son variables en escalas de ~ 1 año. Se observa desde la emisión X de la atmósfera de las estrellas más calientes y masivas (tipos O y B) hasta la emisión coronal de los tipos más tardíos, que comienza a partir de F6. La imagen procede del archivo de *Rosat*. Más detalles en M. Gagné et al. *Astrophysical Journal*, 445, pág. 280 (1995).

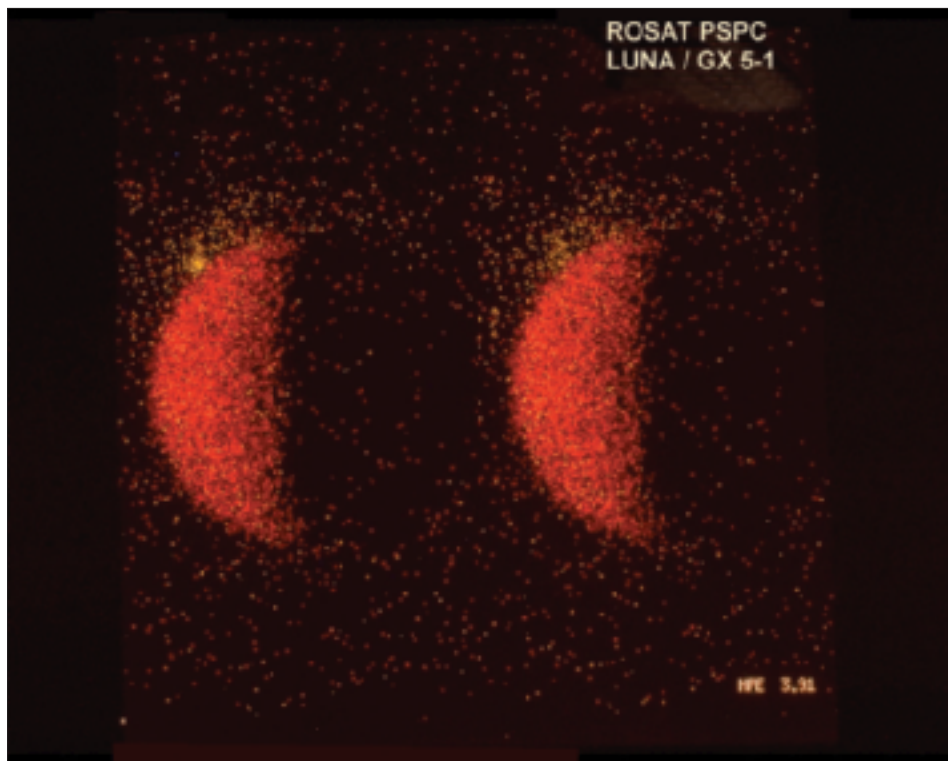


Lámina 8: Ocultación de la binaria de rayos X GX 5-1 por la Luna en marzo de 1991, según la observación de *Rosat*. Los rayos X algo más duros, procedentes de GX 5-1, se han representado en color verde, mientras que los fotones emitidos por la superficie de nuestro satélite, algo más suaves, se han representado en color rojo. Nótese el halo de emisión X que se observa en GX 5-1 justo antes de la salida del eclipse, en la imagen de la izquierda. Estos halos se deben a la difusión producida por el polvo interestelar. Más detalles en el trabajo de P. Prehdel y J. Schmitt en *Astronomy and Astrophysics*, 293, pág. 889 (1995).

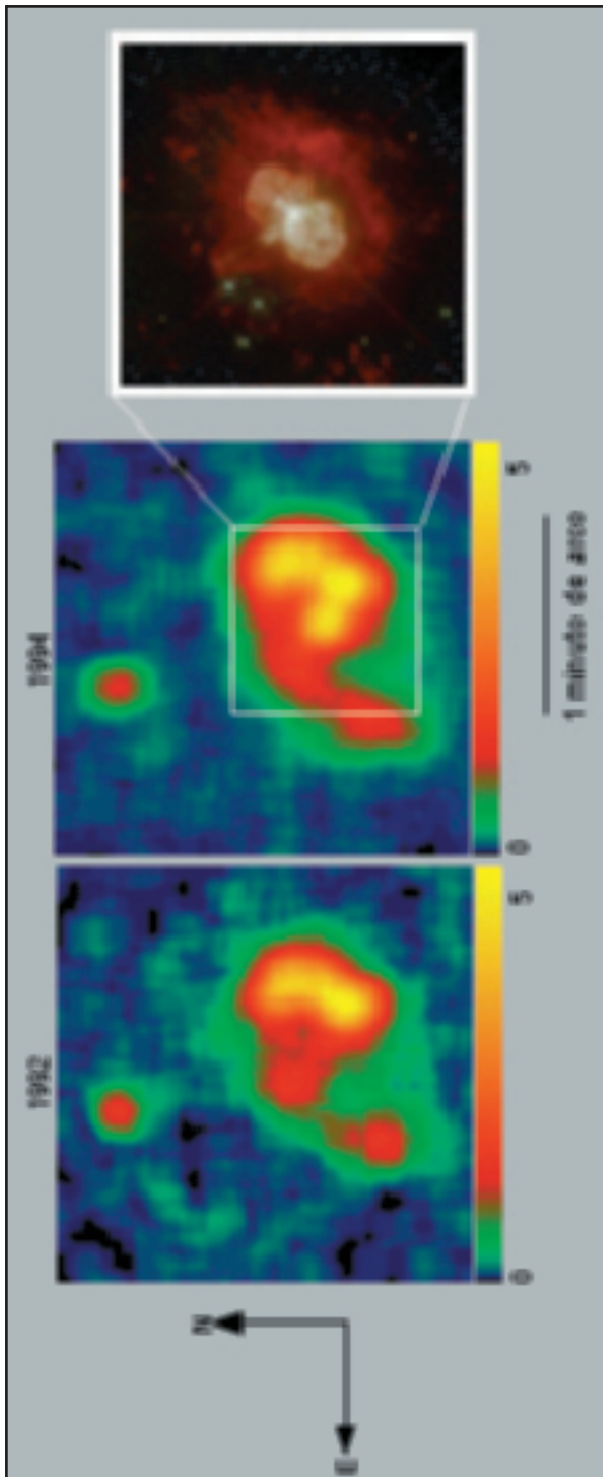


Lámina 9: Eta Carinae es una de las estrellas más masivas y más luminosas de la galaxia, a 7.500 años-luz. En el siglo XIX se produjo una erupción cuyos restos pueden verse en la imagen óptica (parte superior) obtenida con el *Telescopio Espacial Hubble*. Las imágenes en rayos-X, tomadas por el HRI de *Rosat*, muestran diferencias significativas en la estructura de la emisión. En particular, en 1994 se aprecia un aumento del flujo X en la posición de η Carinae. Los últimos datos proporcionados por *RXTE* sugieren que una estrella masiva puede formar un sistema binario junto a la propia η Carinae. Más detalles en el artículo de M. Corcoran y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 445, L121 (1995).

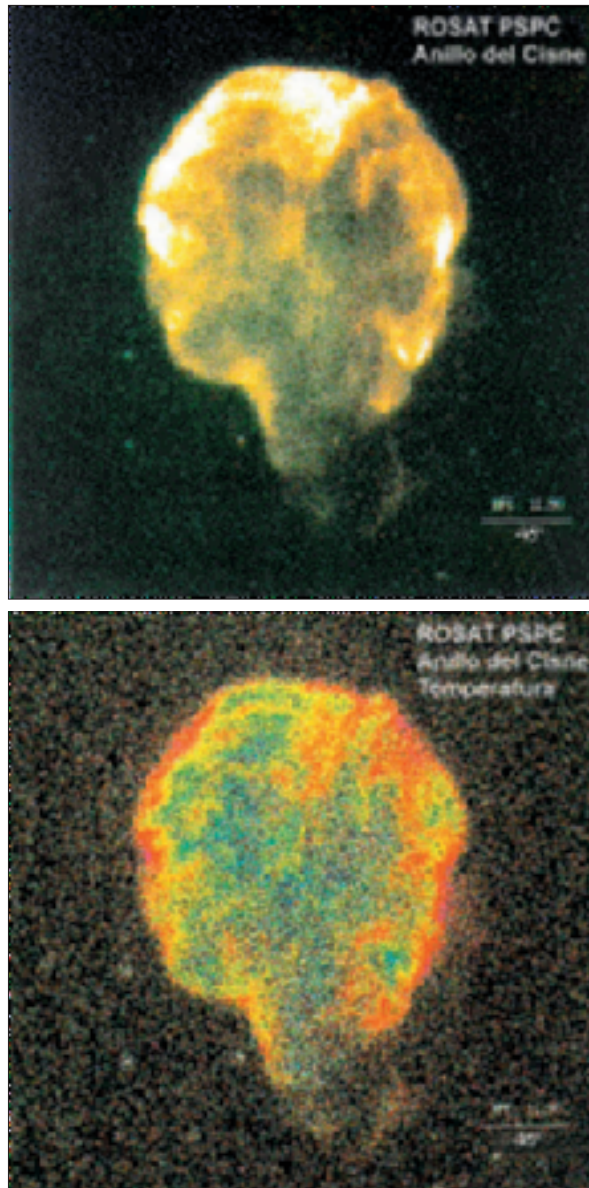


Lámina 10: El residuo de supernova conocido como la Nebulosa del Velo (NGC 6692-95) según *Rosat*. Tiene unos 10.000 ó 20.000 años, y está situado a unos 2.500 años-luz. La imagen superior se obtuvo en noviembre de 1990 durante el muestreo de todo el cielo (RASS) obtenido por el PSPC. En la imagen inferior se puede apreciar la distribución de las temperaturas, desde un millón de grados (rojo) hasta diez millones (azul). Información adicional en el artículo de B. Aschebach y colaboradores, *Advances in Space Research*, 13(12), Pergamon Press, Oxford, pág. 45 (1993).

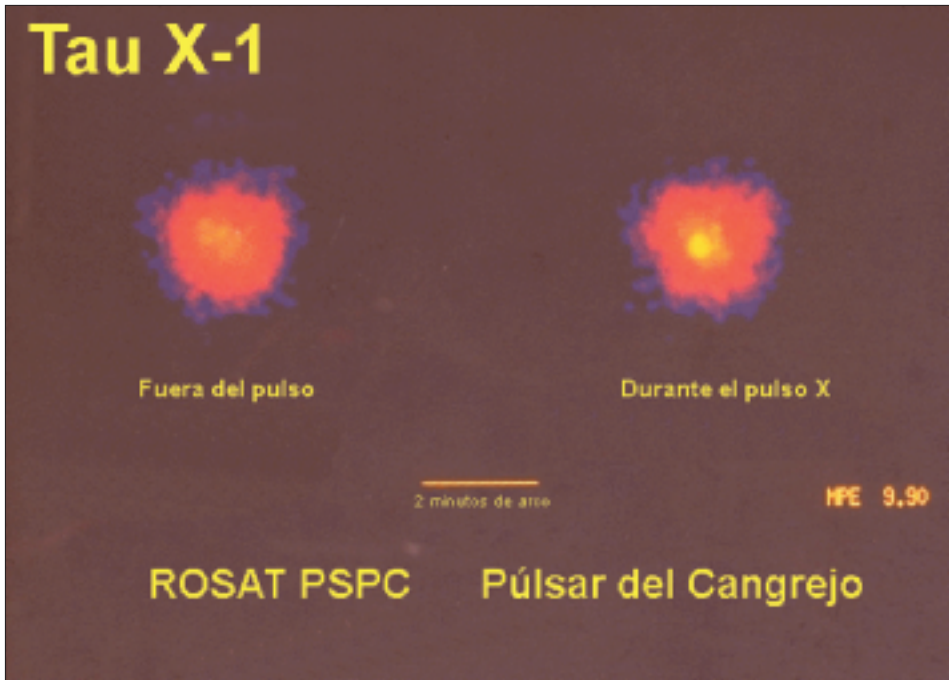


Lámina 11: Estas dos imágenes representan la Nebulosa del Cangrejo (Tau X-1), pero sólo en una de ellas es visible el púlsar, que nos ilumina -a modo de faro celestial- 30 veces por segundo (el punto brillante en la imagen de la derecha). Éste produce electrones altamente relativistas que emiten radiación sincrotrón cuando estos electrones atraviesan el campo magnético de la nebulosa, el residuo de la supernova del año 1054. Más detalles en el trabajo de S. Pravdo y colaboradores, *Astrophysical Journal*, 491, 808 (1997).

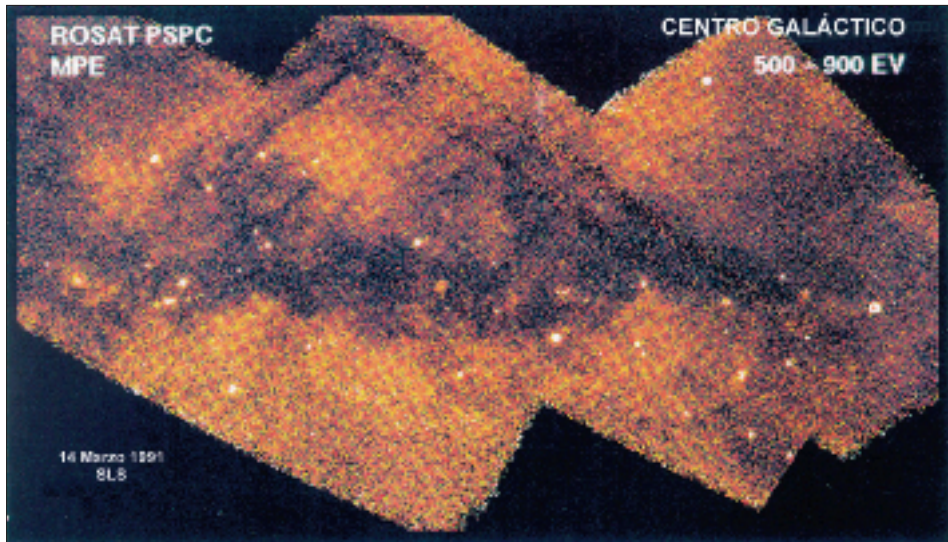


Lámina 12: Una zona de 40 grados en torno al centro galáctico, en el rango 0,5 - 0,9 keV de *Rosat*. Las fuentes más brillantes (puntuales) son binarias de rayos X, conteniendo estrellas de neutrones o agujeros negros. La emisión difusa proviene de las nubes de gas calentadas por explosiones de supernova. Las zonas oscuras se deben a la absorción de los fotones X por parte del gas frío interestelar.

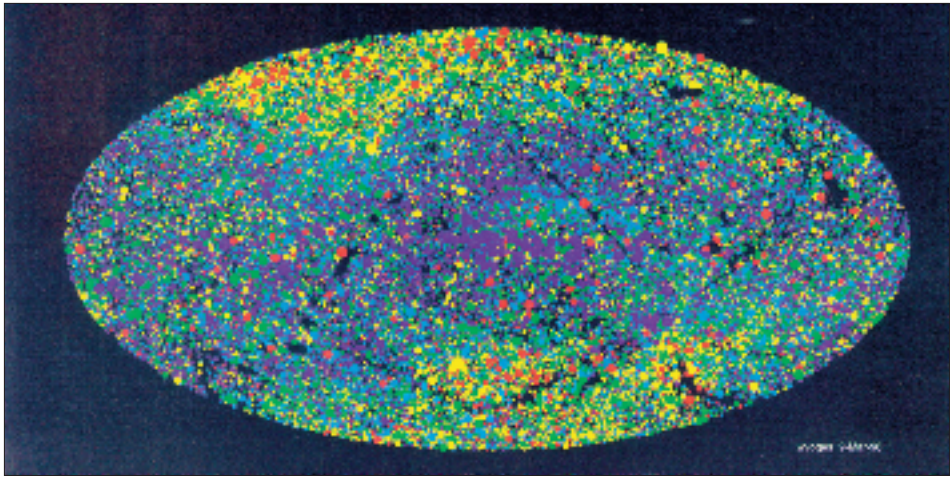


Lámina 13: Imagen de la esfera celeste en coordenadas galácticas de las 77.549 fuentes detectadas por *Rosat* (0,1 - 2,4 keV) en el RASS. La exposición media es de 400 s, lo que corresponde a un nivel de detección de 5×10^{-13} erg/cm²/s. Los objetos emisores en rayos X más suaves se han representando en colores calientes (magenta, rojo) mientras que los de espectro más duro figuran con colores fríos (verdes y azules).

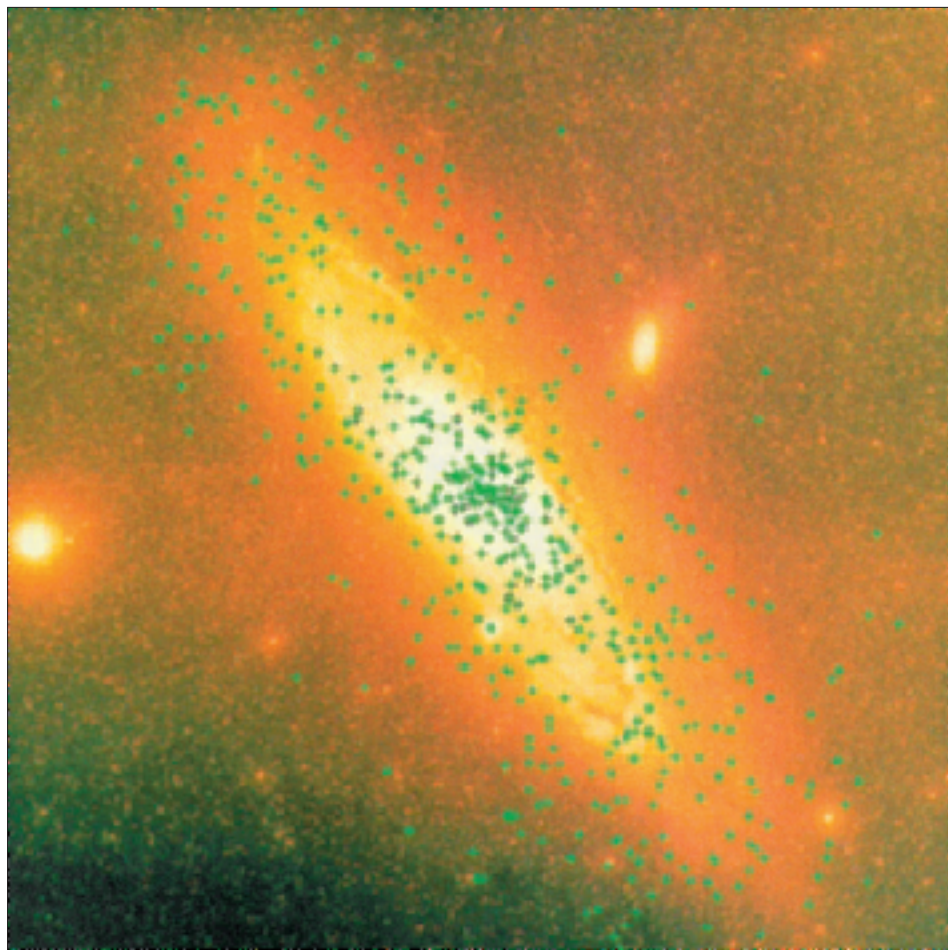


Lámina 14: Todas las 396 fuentes X encontradas por el PSPC de *Rosat* en una zona de 6,3 grados cuadrados en la dirección de la Gran Galaxia de Andrómeda (M 31), a 2,25 millones de años-luz de distancia. Se han superpuesto a una imagen óptica obtenida con el telescopio Schmidt del Monte Palomar (Estados Unidos). Sus flujos X (0,1 - 2,4 keV) están comprendidos entre 4×10^{-12} y 10^{-15} erg cm⁻² s⁻¹. Se estima que un 20 por ciento de las fuentes son objetos de fondo (AGNs, etc.); otro 20 por ciento podrían ser estrellas que pertenecen a nuestra galaxia (ya se han identificado 43) y el 60 por ciento restante se encontraría en M 31. Entre éstas últimas: 29 cúmulos globulares, 17 residuos de supernovas, 15 fuentes X supersuaves y un buen número de binarias de rayos X, algunas de las cuales son altamente variables (al igual que en nuestra Galaxia). La luminosidad total de M 31 es de $(2,9 \pm 0,3) \times 10^{39}$ erg/s, estando la tercera parte concentrada en el bulbo y el resto en el disco. Más información en el artículo de R. Supper y colaboradores *Astronomy and Astrophysics*, 317, pág. 328 (1997).



Lámina 15: La zona central de la galaxia de Andrómeda (M 31) en la que se muestran las binarias cercanas al centro de la misma. El color rojo representa a las binarias con preponderancia de rayos X más blandos (0,35 keV), mientras que el azul indica las binarias con espectros más duros.

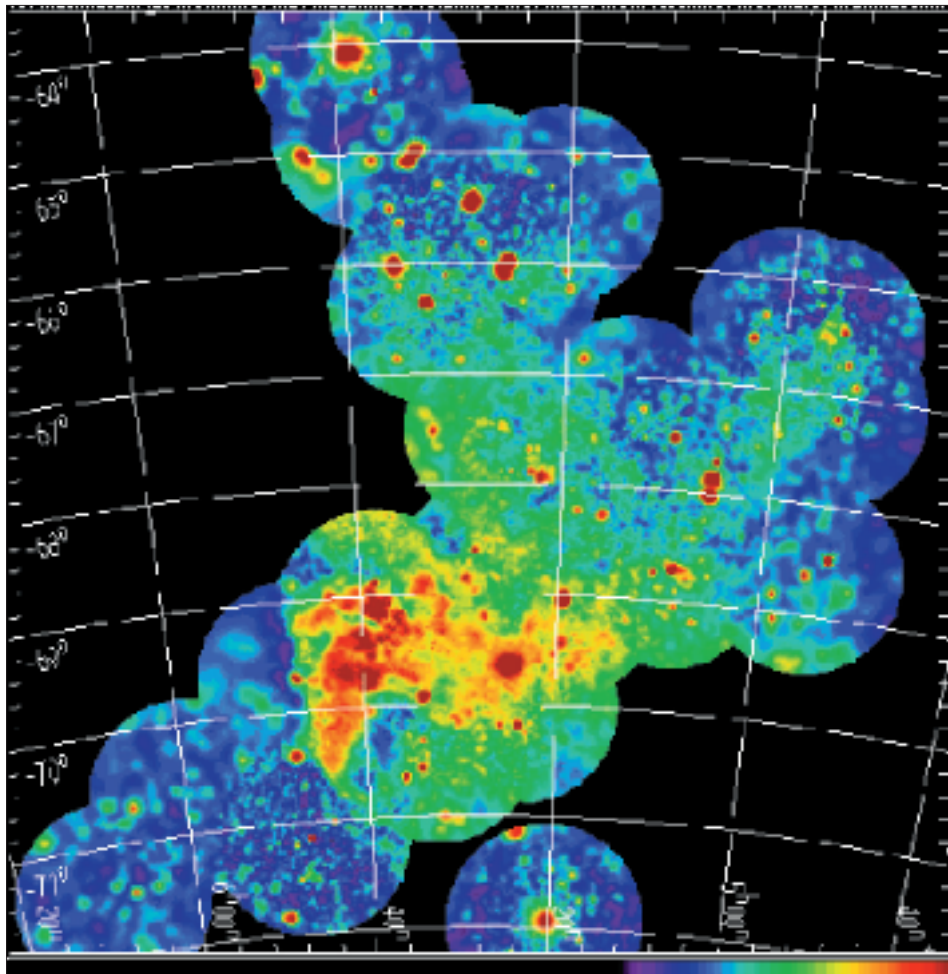


Lámina 16: Este mosaico está formado por diversas exposiciones realizadas por el PSPC de *Rosat*, y muestra la Gran Nube de Magallanes, satélite de nuestra galaxia, a 170.000 años-luz de distancia. Se observa la emisión difusa, indicativa de un medio interestelar muy activo, superpuesta a gran multitud de fuentes puntuales. De S. Snowden y R. Petre, *Astrophysical Journal*, 436, L 123 (1994).

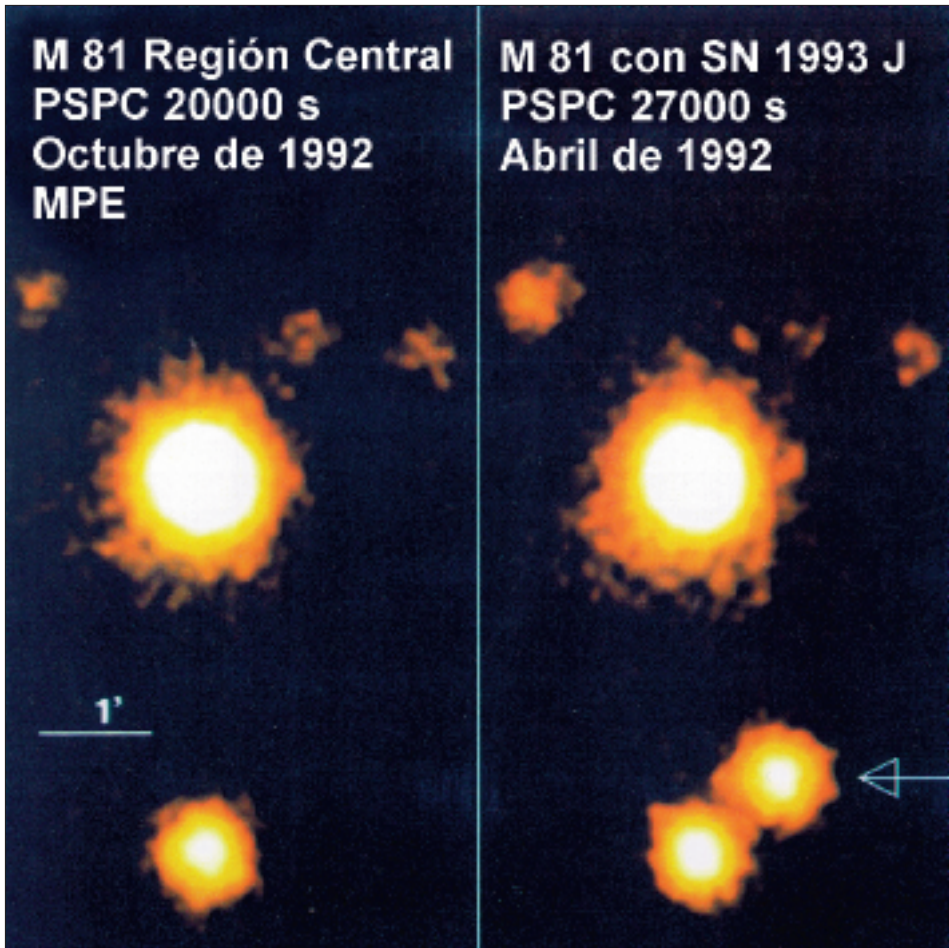


Lámina 17: Observación por *Rosat* de la región central de la galaxia M 81 de la Osa Mayor, antes y después de la aparición de la supernova 1993J descubierta por el aficionado español Francisco Ruiz a finales de marzo de 1993. *Rosat* detectó la emisión X seis días después de la explosión. Más detalles en el trabajo de H. Zimmermann y colaboradores, *Nature*, 367, pág. 621 (1994).

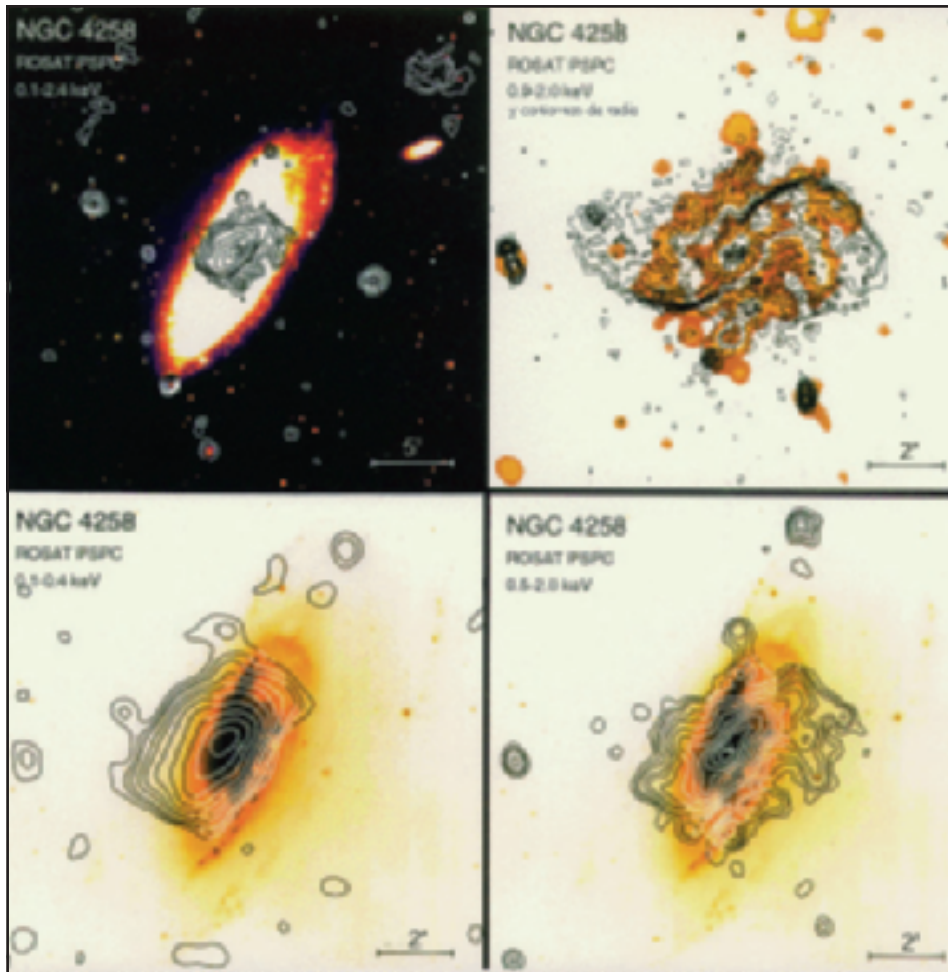


Lámina 18: Cuatro vistas distintas de la galaxia Seyfert NGC 4258 (M 106), observada por *Rosat*. En la parte superior izquierda se muestran los contornos de la emisión X superpuestos a una imagen óptica profunda. La imagen superior derecha representa los contornos de la emisión radio y X. Las radiofrecuencias trazan bien los brazos espirales, un tanto anómalos. Las dos imágenes inferiores permiten ver la diferencia entre la emisión de rayos X blandos y duros emitidos en la zona central de la espiral, cuya imagen óptica también se muestra. Más información del mismo objeto observado con el HRI en el artículo de G. Cecil y colaboradores, *Astrophysical Journal* 440, pág. 181 (1995).

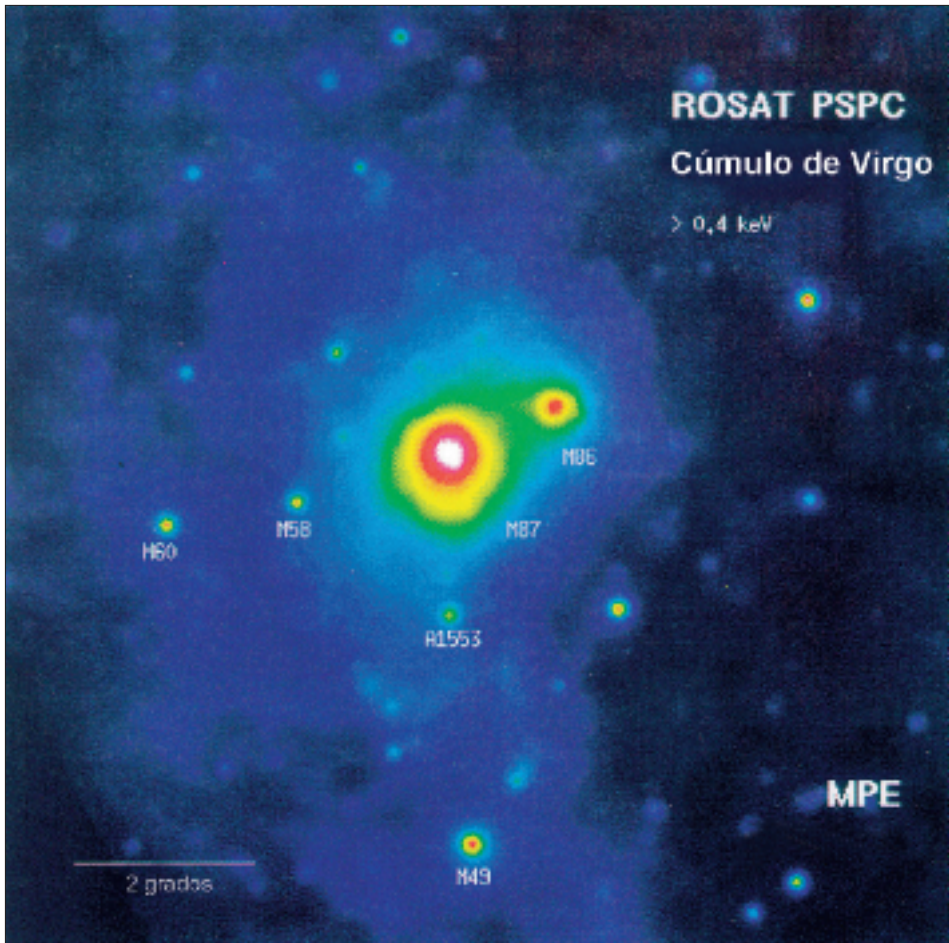


Lámina 19: El cúmulo de galaxias de Virgo según observación del PSPC de *Rosat* durante el RASS. La gran concentración de galaxias observadas en el cúmulo (M 49, M 58, M60, M86, M 87, M89, etc.) no hace sino recordarnos que estamos inmersos en él. Su centro está a 40 millones de años-luz de distancia. La emisión X se concentra hacia la galaxia gigante M 87. Además se sospecha que M 86 es actualmente parte de un pequeño grupo de galaxias que está siendo engullido por el cúmulo de Virgo. Más detalles en el trabajo de W. Voges en *First Results from Asca*, Universal Academic Press, Tokio, pág. 200 (1995).

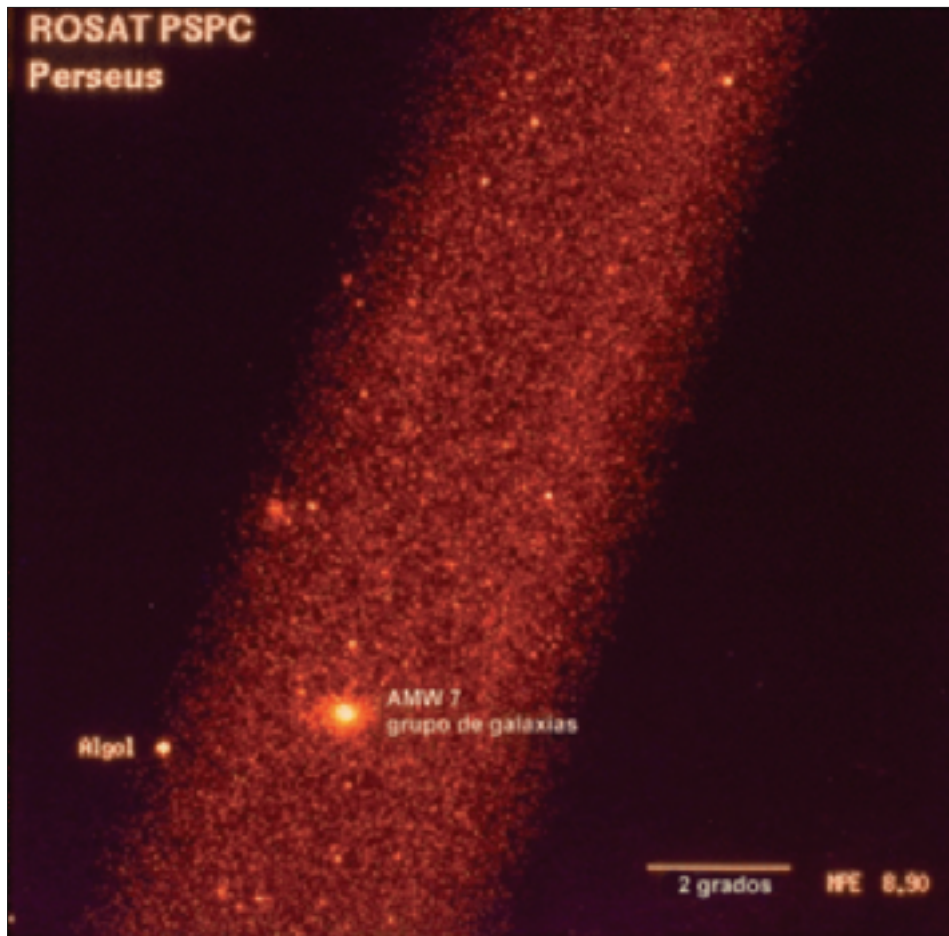


Lámina 20: La constelación de Perseo por *Rosat*. Imagen superior: una de las franjas que configuran el muestreo de todo el cielo (RASS) obtenido por el PSPC.

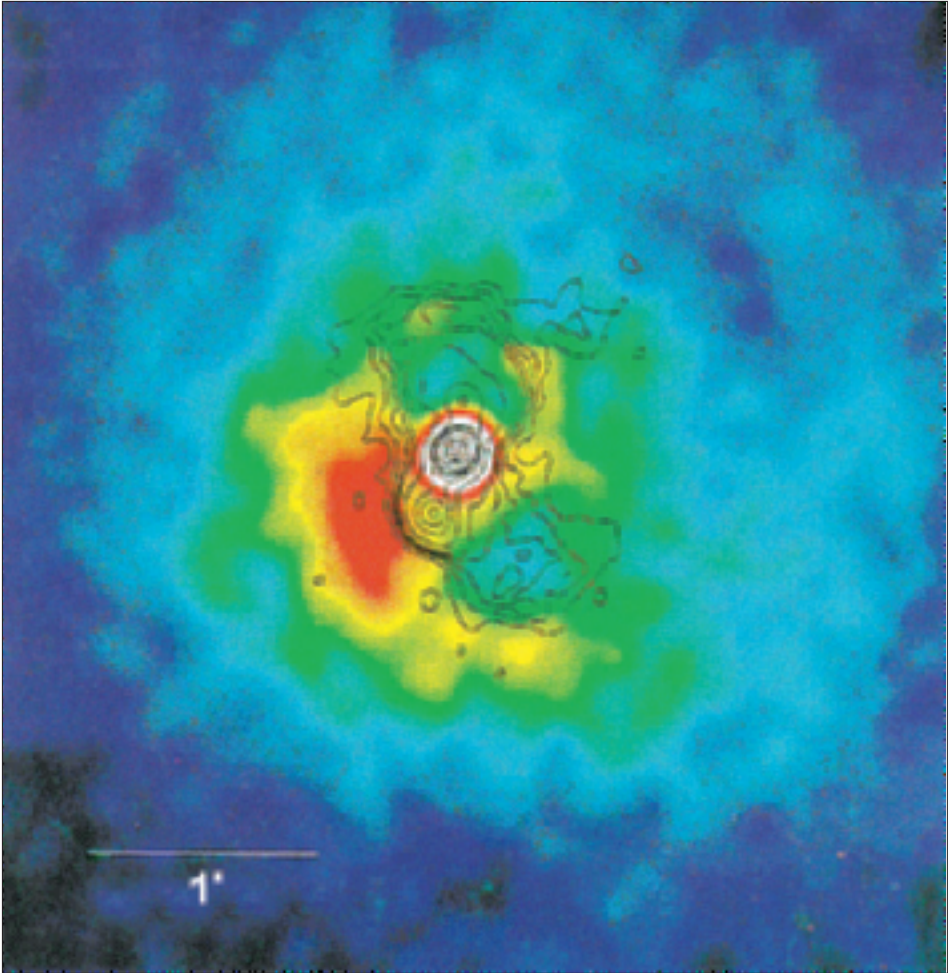


Lámina 21: Detección por el HRI de la galaxia activa NGC 1275, en el centro del cúmulo de galaxias de Perseo (Abell 426). Se muestran los radio contornos obtenidos a partir de la observación del *Very Large Array* (VLA). El máximo de emisión radio coincide con el máximo de emisión X, en el propio núcleo de la galaxia. Por el contrario, la emisión X prácticamente desaparece en los radio lóbulos. Es obvio que el plasma caliente, emisor de rayos X ha sido desplazado por las partículas radioemisoras, altamente relativistas. Información adicional en B. McNamara y colaboradores, *Astronomical Journal*, 112, *The American Astronomical Society*, Washington, pág. 91 (1996).

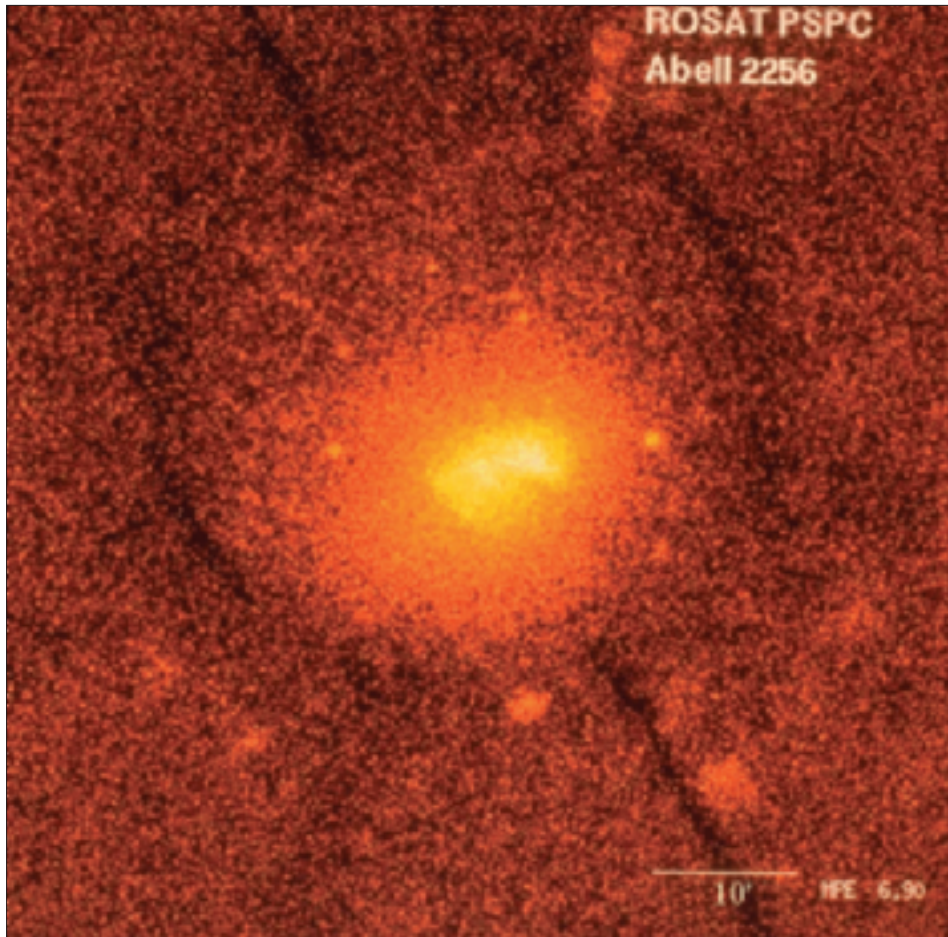


Lámina 22: Observación de *Rosat* del cúmulo Abell 2256. Nótese como la emisión X, producida por un plasma a 80 millones de grados, está dividida en dos, indicando que se está produciendo la unión de dos cúmulos de galaxias. En total, hay unas 500 galaxias a 1.000 millones de años-luz de distancia. Abell 2256 subtiende 10 millones de años-luz.

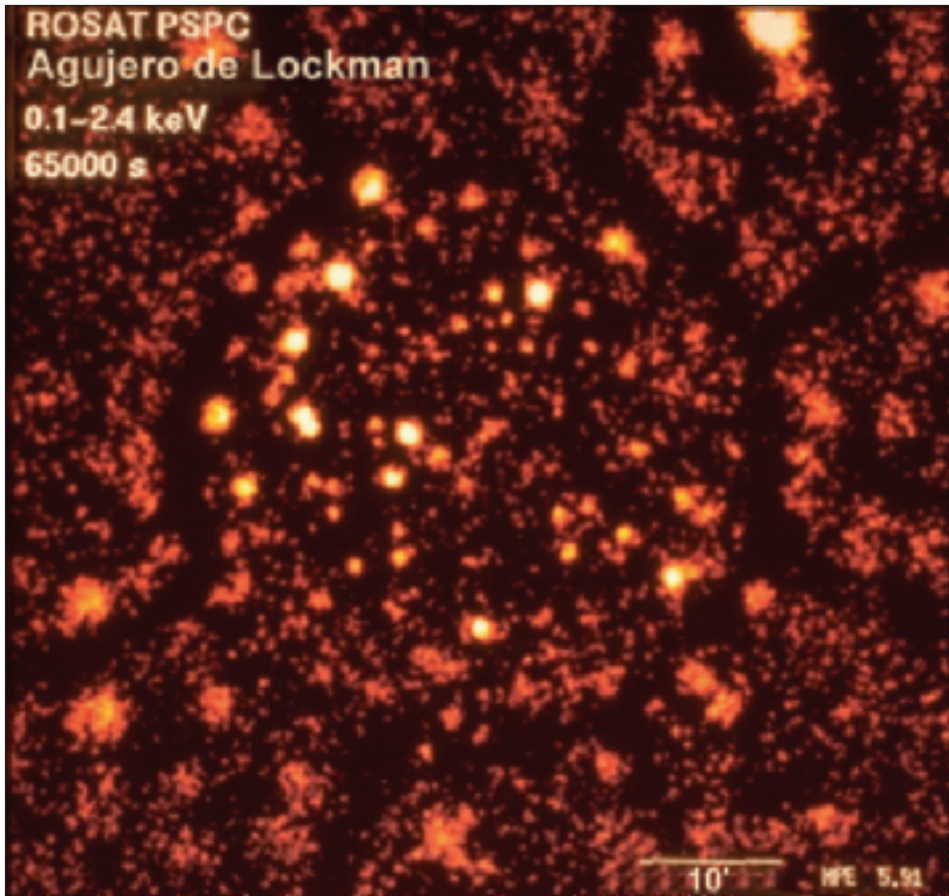


Lámina 23: La observación de *Rosat* a través del agujero de Lockman, probablemente el sitio más idóneo que hay en la esfera celeste para mirar al Universo extragaláctico en los rayos X blandos, pues es aquí donde la absorción producida por la materia interestelar de nuestra Galaxia alcanza el mínimo absoluto. Esta ha sido la observación más profunda jamás realizada por *Rosat*, con una exposición equivalente a casi 2,4 días. El flujo de los objetos más débiles no sobrepasa 2×10^{-15} erg/cm²/s. Los diversos colores representan objetos con máximo de emisión en los rayos X blandos alrededor de 0,25 keV (rojo), 0,75 keV (verde) y 1,5 keV (azul). Las fuentes de rayos X más duros son casi con toda seguridad galaxias activas, cuya emisión de rayos X blandos ha sido absorbida por gas y polvo cercanos a los núcleos de las mismas. La posición es AR (2000) = 10 h 52.0 m, Dec(2000) = +57°21'36". La imagen cubre 40'. Más detalles se pueden consultar en M. Schmidt y colaboradores, *Astronomy and Astrophysics* 329, pág. 482 (1998).

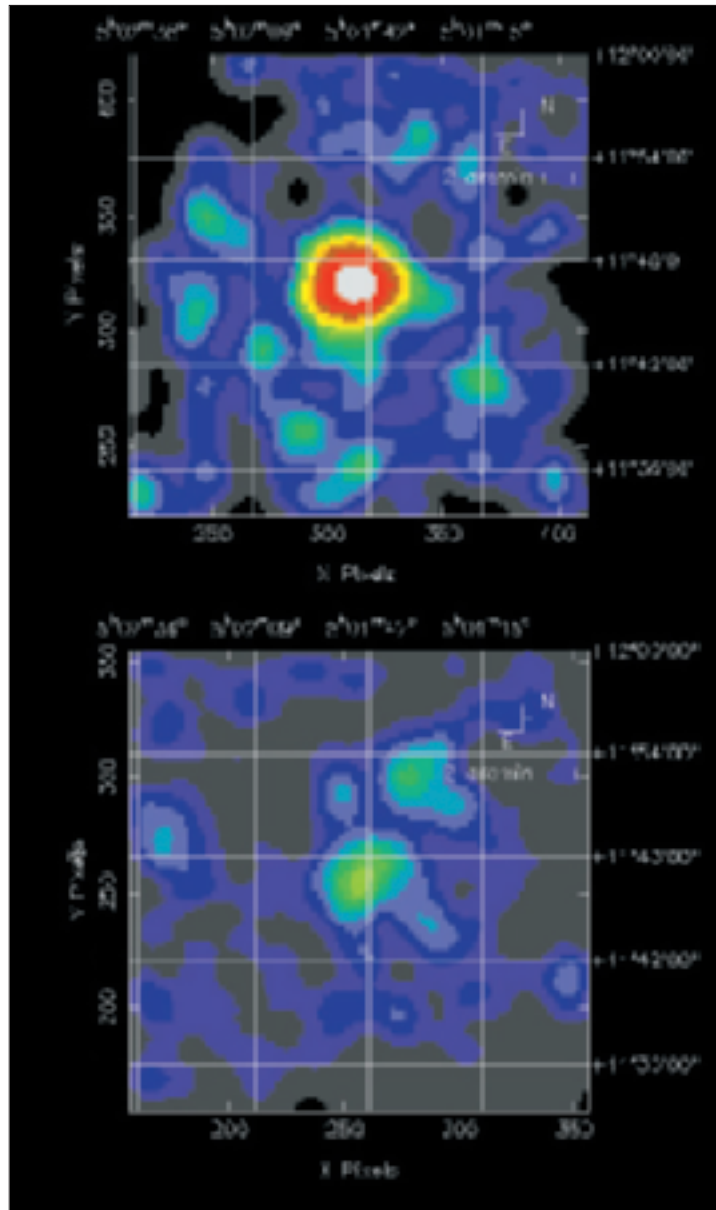


Lámina 24: El descubrimiento de la emisión de rayos X que siguió a GRB 970228, la explosión cósmica de rayos gamma ocurrida el 28 de febrero de 1997, según observación de *BeppoSAX*. Nótese la tremenda variación del flujo X (un factor 20) de la primera observación (8 horas después) a la segunda (tres días). Con posterioridad, esta fenomenología se ha venido observando en otros casos. Cortesía de Enrico Costa y el equipo de BeppoSax (Roma, Italia). Más detalles en el trabajo de E. Costa y colaboradores en *Nature*, 387, 783 (1997).